

BIOMASSE ET BIOCARBURANTS



M.S.LACHGAR

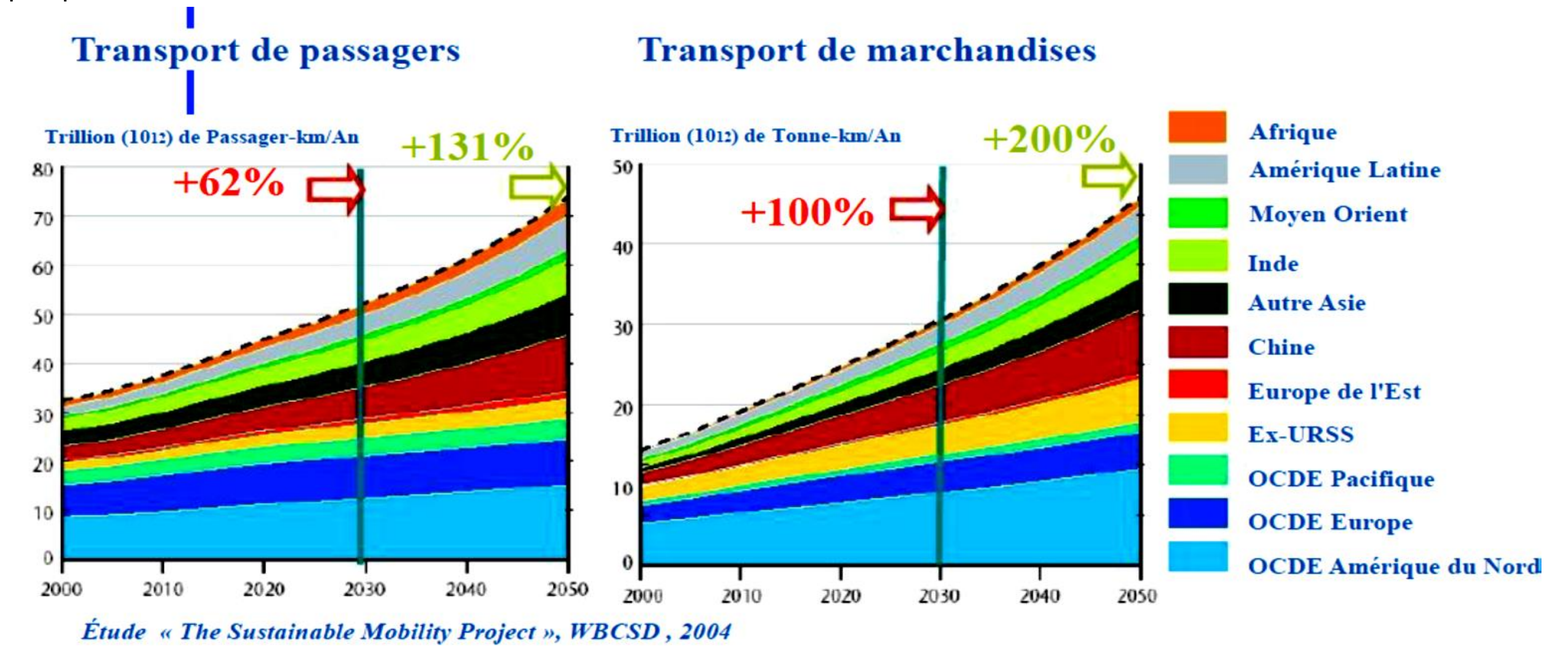
UBM -ANNABA

2017

Sommaire

I. INTRODUCTION

La production de biocarburants est aujourd'hui en plein essor car leur utilisation a plusieurs avantages. Tout d'abord, les biocarburants permettent une diminution de la pollution de l'air et le changement climatique puisque le bilan du rejet de CO2 est moins important. A l'inverse du pétrole, les biocarburants constituent des ressources renouvelables, ce qui permettrait de répondre à l'accroissement de la demande mondiale en carburant et de contribuer à combattre le problème causé par la disparition des réserves de combustibles fossiles, non renouvelables.
Les biocarburants restent cependant minoritaires face au pétrole, et les objectifs politiques, pourtant très ambitieux : 8% de la consommation de carburants en 2020 en Europe, 20% en 2030 aux Etats-Unis, montrent que cela le restera pour encore quelques décennies.



Étude « The Sustainable Mobility Project », WBCSD , 2004

I.1. Rappels Sur Les Caractéristiques Des Carburants Conventionnels

On rappelle que le terme carburant désigne tous produit énergétique, qui par combustion dans un moteur (ou réacteur) permettra de récupérer du travail. Les combustibles sont les produits dont la combustion produit de la chaleur.

Les carburants les plus utilisés sont :

- Les essences pour les moteurs à allumage commandés
- Le gasoil pour les moteurs diesel
- Les carburéacteurs (jet fuel) pour les réacteurs d'avion
- Le GPL ou gaz de pétrole liquéfié
- Le GNV ou gaz naturel véhicule

Produit / Caractéristique	**Butane commercial**	**Propane commercial**	**GPL Carburant** (reprise de NF EN 589) (voir le fascicule de documentation M 40-003)
Définition (en % volume)	Surtout butanes/butènes < 19 % propane/propène	90 % env. propane/propène 10 % éthane/éthylène/butanes/butènes	Surtout propane, butanes et propène/butènes/pentanes/pentènes
Odeur	Caractéristique	Caractéristique	Caractéristique et détectable à conc. > 20 % limite infér. d'inflammabilité (NF EN 589, Annexe A)
Masse volumique (NF M 41-008)	≥ 0,559 kg/l à 15 °C (≥ 0,513 kg/l à 50 °C)	≥ 0,502 kg/l à 15 °C (≥ 0,443 kg/l à 50 °C)	
Pression de vapeur relative (NF M 41-010)	≤ 690 kPa à 50 °C	≥ 830 kPa à 37,8 °C (≥ 1150 kPa à 50 °C) ≤ 1440 kPa à 37,8 °C (≤ 1930 kPa à 50 °C)	
Pression de vapeur absolue (NF M 41-010/ISO 4256)			≥ 250 kPa à − 10 °C ≤ 1550 kPa à 40 °C (ISO 4256)
Teneur en soufre		≤ 0,005 % masse (NF M 41-009)	Après odorisation (NF T 60-142/EN 41/EN 24260) ≤ 200 mg/kg
Composés sulfurés	Absence de réaction à l'essai au plombite (NF M 41-006)		Sulfure d'hydrogène "passe" (ISO 8819, future NF EN 28819)
Corrosion lame de cuivre (NF M 41-007)	≤ 1 b	≤ 1 b	≤ 1 (ISO 6251)
Teneur en eau	Absence par décantation	Non décelable au plombite de sodium (NF M 41-004)	Passer le test de givrage de vanne (ASTM D 2713, future NF EN 213758)
Évaporation (NF M 41-012)	≤ 1 °C Point final d'ébullition (méthode dite du point à 95 %)	≤ − 15 °C	
Résidu d'évaporation (NF M 41-015)			≤ 100 mg/kg
Indice d'octane moteur (MON) (NF EN 589 Annexe B)			≥ 89
Teneur en diènes comme 1,3 butadiène (ISO 7941/M 41-013)			≤ 0,5 % mol

Caractéristiques	Spécifications
Définition	Mélange d'hydrocarbures d'origine minérale ou de synthèse
Couleur	Rouge (4 mg/l de rouge écarlate)
Masse volumique à 15 °C (NF T 60-101)	0,700 kg/l ≤ masse volumique ≤ 0,750 kg/l
Distillation (NF M 07-002) (% vol, pertes comprises)	entre 10 % et 47 % à 70 °C entre 40 % et 70 % à 100 °C ≥ 85 % à 180 °C ≥ 90 % à 210 °C
Écart point 5 % – point 90 % (pertes comprises) Point final Résidu	> 60 °C ≤ 215 °C ≤ 2 % vol
Pression de vapeur à 37,8 °C (PVR) (NF M 07-007) Indice de volatilité (VLI) (VLI = 10 PVR + 7 E70) (où E70 = % vol évaporé à 70 °C) (PVR en kPa)	Du 20/6 au 9/9 45 kPa ≤ PVR ≤ 79 kPa VLI ≤ 900 Du 10/4 au 19/6 et du 10/9 au 31/10 50 kPa ≤ PVR ≤ 86 kPa Du 1/11 au 9/4 VLI ≤ 1 000 55 kPa ≤ PVR ≤ 99 kPa VLI ≤1 150
Teneur en soufre (NF T 60-142)	≤ 0,20 % masse
Corrosion lame de cuivre (NF M 07-015)	3 h à 50 °C: ≤ 1 b
Teneur en gommes actuelles (NF EN 26246)	≤ 10 mg/100 cm³
Indice d'octane “recherche” (RON) (NF M 07-026)	89 ≤ RON ≤ 92
Teneur en plomb (NF M 07-043)	< 0,15 g de plomb métal par l d'essence en Pb $(Et)_4$ ou Pb $(Me)_4$ ou leur mélange
Teneur en benzène (NF M 07-062)	≤ 5 % vol
Additifs	Agréés par la DHYCA (Ministère de l'Industrie)

Autre caractéristique souvent exigée	
Indice d'octane “moteur” (MON ≤ 95 en spécification douanière)	NF M 07-026

Tableau 7.2 *Spécifications et méthodes d'essai relatives à l'essence-auto (voir le fascicule de documentation M 15-001).*

Caractéristiques	Spécifications
Définition	Mélange d'hydrocarbures d'origine minérale ou de synthèse et éventuellement de composés oxygénés
Couleur	Jaune pâle
Masse volumique à 15 °C (NF T 60-101)	720 kg/m³ ≤ masse volumique ≤ 770 kg/m³
Distillation (NF M 07-002) (% vol, pertes comprises)	entre 10 % et 47 % à 70 °C entre 40 % et 70 % à 100 °C ≥ 85 % à 180 °C ≥ 90 % à 210 °C
Écart point 5 % – point 90 % (pertes comprises) Point final Résidu	> 60 °C ≤ 215 °C ≤ 2 % vol
Pression de vapeur à 37,8 °C (PVR) (NF M 07-007) Indice de volatilité (VLI) (VLI = 10 PVR + 7 E70) (où E70 = % vol évaporé à 70 °C) (PVR en kPa)	Du 20/6 au 9/9 45 kPa ≤ PVR ≤ 79 kPa VLI ≤ 900 Du 10/4 au 19/6 et du 10/9 au 31/10 50 kPa ≤ PVR ≤ 86 kPa VLI ≤ 1 000 Du 1/11 au 9/4 55 kPa ≤ PVR ≤ 99 kPa VLI ≤ 1 150
Teneur en soufre (NF T 60-142)	≤ 0,15 % masse
Corrosion lame de cuivre (NF M 07-015)	3 h à 50 °C: ≤ 1 b
Teneur en gommes actuelles (NF EN 26246)	≤ 10 mg/100 cm³
Indice d'octane “recherche” (RON) et “moteur” (MON) (NF EN 25164, NF EN 25163 et NF M 07-026)	97 ≤ RON ≤ 99 MON ≥ 86
Teneur en plomb (NF M 07-043) (destinée à être remplacée par NF EN 23830)	≤ 0,15 g de plomb métal/l de supercarburant en Pb $(Et)_4$ ou Pb $(Me)_4$ ou leur mélange
Teneur en benzène (NF M 07-062)	≤ 5 % vol
Additifs	Agréés par la DHYCA (Ministère de l'Industrie)

Autres caractéristiques souvent exigées	
Stabilité à l'oxydation (méthode de la période d'induction)	NF M 07-012
Teneur en composés oxygénés	NF M 07-054

Tableau 7.3 *Spécifications et méthodes d'essai relatives au supercarburant (voir le fascicule de documentation M 15-005).*

Caractéristiques	Spécifications		
Définition	Mélange d'hydrocarbures d'origine minérale ou de synthèse et éventuellement de composés oxygénés		
Aspect	Clair et limpide		
Couleur	Vert (2 mg/l de bleu + 2 mg/l de jaune)		
Masse volumique (NF T 60-101/NF T 60-172)	725 kg/m³ ≤ masse volumique ≤ 780 kg/m³ à 15 °C		
Teneur en soufre (NF T 60-142/M 07-053)	≤ 0,10 % masse (≤ 0,05 % masse à partir du 1er janv. 95)		
Corrosion lame de cuivre (NF M 07-015/ISO 2160)	3 h à 50 °C : classe 1		
Gommes actuelles après lavage (NF EN 26246)	≤ 5 mg/100 ml		
Indice d'octane "recherche" (RON) (NF EN 25164 et NF EN 07-026) "moteur" (MON) (NF EN 25163 et NF M 07-026)	RON ≥ 95 MON ≥ 85		
Teneur en plomb (EN 237/M 07-061)	≤ 0,013 g/l		
Teneur en benzène (EN 238/ASTM D 2267)	≤ 5 % vol		
Stabilité à l'oxydation (NF M 07-012/ISO 7536)	≥ 360 min		
Teneur en phosphore	Aucun composant phosphoré ne doit être incorporé		
Tolérance à l'eau	Pas de décantation		
Volatilité	du 20/6 au 9/9 classe 1 du 10/4 au 19/6 et du 10/9 au 31/10 classe 3 du 1/11 au 9/4 classe 6		
	Classe 1	**Classe 3**	**Classe 6**
Pression de vapeur PVR (kPa) (NF EN 12/M 07-007) min / max	35 70	45 80	55 90
% évaporé à 70 °C E70 (% vol) (NF M 07-002/ISO 3405) min / max	15 45	15 45	15 47
Indice de volatilité VLI VLI = 10 PVR + 7 (E70) (PVR en kPa)	≤ 900	≤ 1 000	≤ 1 150
% évaporé à 100 °C (% vol) (NF M 07-002/ISO 3405) min / max	40 65	40 65	43 70
% évaporé à 180 °C (% vol) (NF M 07-002/ISO 3405)	≥ 85	≥ 85	≥ 85
Point final de distillation (NF M 07-002/ISO 3405)	≤ 215 °C	≤ 215 °C	≤ 215 °C
Résidu de distillation % vol (NF M 07-002/ ISO 3405)	≤ 2 %	≤ 2 %	≤ 2 %
Acidité de l'éthanol (éventuel) (ISO 1388/2)	≤ 0,007 % masse comptée en acide acétique		

Tableau 7.4 *Spécifications et méthodes d'essai relatives au supercarburant sans plomb (reprises de la norme NF EN 228 ; voir le fascicule de documentation M 15-023).*

Caractéristiques	Spécifications
Définition	Mélange d'hydrocarbures d'origine minérale ou de synthèse
Masse volumique à 15 °C (NF T 60-101/ISO 3675)	820 kg/m³ ≤ masse volumique ≤ 860 kg/m³
Distillation (NF M 07-002/ISO 3405) en % vol (pertes comprises)	< 65 % à 250 °C ≥ 85 % à 350 °C ≥ 95 % à 370 °C
Viscosité à 40 °C (NF T 60-100/ISO 3104)	2 mm²/s ≤ ν < 4,5 mm²/s
Teneur en soufre (NF T 60-142/M 07-053)	≤ 0,3 % masse (≤ 0,2 % du 1/10/94 au 30/9/96, ≤ 0,05 % à partir du 1/10/96)
Teneur en eau (NF T 60-154/ASTM D 1744)	≤ 200 mg/kg
Teneur en cendres (NF EN 26245/M 07-045)	≤ 0,01 % masse
Teneur en sédiments (DIN 51419)	≤ 24 mg/kg
Corrosion à la lame de cuivre (NF M 07-015/ISO 2160)	3 h à 50 °C: classe 1
Stabilité à l'oxydation (NF M 07-047/ASTM D 2274)	≤ 25 g/m³
Indice de cétane mesuré (NF M 07-035/ISO 5165)	≥ 49
Indice de cétane calculé (ISO 4264)	≥ 46
Carbone Conradson (sur le résidu de distillation 10 % vol) (NF T 60-116/ISO 10 370)	≤ 0,30 % masse
Point d'éclair (NF EN 22719)	> 55 °C
Additifs	Agréés par la DHYCA (Ministère de l'Industrie)
Température limite de filtrabilité (NF EN 116/M 07-042)	du 1/11 au 30/04 : ≤ − 15 °C du 1/05 au 31/10 : 0 °C Grand Froid : ≤ − 20 °C

Autres caractéristiques souvent exigées	
Point de trouble	NF EN 23015
Point d'écoulement	NF T 60-105
Indice de neutralisation	NF T 60-112
Teneur en sédiments	NF M 07-010

Tableau 7.5 *Spécifications et méthodes d'essai relatives au gazole moteur (qualité normale et qualité grand froid) (reprises de la norme NF EN 590 ; voir les fascicules de documentation M 15-007 et M 15-022).*

Caractéristiques	Spécifications
Aspect	Clair et limpide
Acidité totale (ASTM D 3242/IP 354)	≤ 0,015 mg KOH/g
Aromatiques (NF M 07-024/ASTM D 1319/IP 156)	≤ 20 % volume
Oléfines (NF M 07-024/ASTM D 1319/IP 156)	≤ 5 % volume
Soufre total (ASTM D 1266/ASTM D 2622)	≤ 0,30 % masse
Soufre mercaptan (NF M 07-022/ASTM D 3227/IP 342) ou "Doctor Test" (NF M 07-029/ASTM D 235/IP 30)	≤ 0,002 % masse Négatif
Distillation (NF M 07-002/ASTM D86/IP 123)	≤ 204 °C à 10 % vol ≤ 300 °C au point final résidu ≤ 1,5 % vol pertes ≤ 1,5 % vol
Point d'éclair (NF M 07-011/IP 170) (ASTM D 3828/IP 303)	≥ 38 °C
Masse volumique à 15 °C (NF T 60-101/ASTM D 1298/IP 360) (NF T 60-172/ASTM D 4052/IP 365)	775 kg/m³ ≤ masse volumique ≤ 840 kg/m³
Point de décongélation (NF M 07-048/ASTM D 2386/IP 16)	≤ − 47 °C
Viscosité à − 20 °C (NF T 60-100/ASTM D 445/IP 71)	≤ 8,0 mm²/s
Pouvoir calorifique inférieur (NF M 07-030/ASTM D 2382/IP 12 ou ASTM D 1405/IP 193) ou "Aniline Gravity Product" (NF M 07-021/ASTM D 611/IP 2 et normes de masse volumique)	≥ 42,8 MJ/kg ≥ 4 800
Point de fumée (NF M 07-028/ASTM D 1322) ou Indice luminomètre (ASTM D 1740) ou {Point de fumée {et naphtalènes ASTM D 1840)	≥ 25 mm ≥ 45 ≥ 20 mm ≤ 3,0 % vol
Corrosion cuivre (NF M 07-015/ASTM D 130/IP 154)	2 h à 100 °C : ≤ 1
Corrosion argent (IP 227)	4 h à 50 °C : ≤ 1
Stabilité thermique (JFTOT) (NF M 07-051/ASTM D 3241/IP 323) ΔP du filtre Cotation tube (visuelle) Dépôt de couleur	≤ 25,0 mmHg ≤ 3 Néant
Gommes actuelles (NF M 07-004/ASTM D 381/IP 131)	≤ 7 mg/100 ml
Tolérance à l'eau (ASTM D1094/IP 289) Cotation interface Cotation séparation	≤ 1 b ≤ 2
WSIM *(Water Separatometer Index Modified)* (M 07-050/ASTM D 2550/ASTM D 3948)	≥ 85 ou ≥ 70 avec additif anti-statique
Conductivité (ASTM D 2624/IP 274)	50 pS/m ≤ λ ≤ 450 pS/m

Tableau 7.6 *Spécifications et méthodes d'essai relatives au carburéacteur. (Les spécifications des carburéacteurs sont fixées au niveau international et sont reprises dans "l'Aviation Fuel Quality Requirements for Jointly Operated Systems").*

I.2. Contexte économico-environnemental



Estimated U.S. Energy Use in 2012: ~95.1 Quads

Solar 0.235
Nuclear 8.05
Hydro 2.69
Wind 1.36
Geothermal 0.227
Natural Gas 26.0
Coal 17.4
Biomass 4.32
Petroleum 34.7

0.0408
8.05
2.67
9.31
1.36
15.9
0.163
0.193

Electricity Generation 38.1

Net Electricity Imports
0.161
12.4

25.7
Rejected Energy 58.1
3.72
4.69
Residential 10.6
6.90
0.0396
4.26
0.420
1.02
0.0197
4.52
Commercial 8.29
2.90
5.39
2.96
0.0180
0.0433
0.632
0.109
3.35
4.77
Energy Services 37.0
8.70
Industrial 23.9
19.1
1.48
2.20
8.12
0.429
21.1
1.16
0.0256
0.218
0.764
Trans-portation 26.7
24.7
5.60

Source: LLNL 2013. Data is based on DOE/EIA-0035(2013-05), May, 2013. If this information or a reproduction of it is used, credit must be given to the Lawrence Livermore National Laboratory and the Department of Energy, under whose auspices the work was performed. Distributed electricity represents only retail electricity sales and does not include self-generation. EIA reports consumption of renewable resources (i.e., hydro, wind, geothermal and solar) for electricity in BTU-equivalent values by assuming a typical fossil fuel plant "heat rate." The efficiency of electricity production is calculated as the total retail electricity delivered divided by the primary energy input into electricity generation. End use efficiency is estimated as 65% for the residential and commercial sectors 80% for the industrial sector, and 21% for the transportation sector. Totals may not equal sum of components due to independent rounding. LLNL-MI-410527

Les atteintes à l'environnement aussi bien au niveau local, régional que global, sont multiples et couvrent un éventail très large de risques, dont une grande partie est liée à la production, la transformation et l'utilisation des carburants et aux émissions atmosphériques associées.

Au niveau régional ou global par exemple on cite, l'acidification des sols et des végétaux (pluies acides),
la pollution photochimique
les problèmes liés au réchauffement climatique (effet de serre).
ou encore les atteintes à la santé

(MAPA : Metropolitan area of Porto Alegre)

Average pollutants concentrations in the MAPA in 2006, 2007 and 2008.

Year	PM_{10} $\mu g.m^{-3}$	$PM_{2.5}$ $\mu g.m^{-3}$	CO $mg.m^{-3}$	NO_X $\mu g.m^{-3}$	O_3 $\mu g.m^{-3}$	SO_2 $\mu g.m^{-3}$	HC $\mu g.m^{-3}$	PAHs * $ng.m^{-3}$
2006	34.96	15.4	0.80	45.03	27.32	9.48	---	7.8133
2007	30.0	---	0.848	45.79	30.78	24.40	1.97	----
2008	30.22	12.5	0.32	36.38	26.69	13.26	1.50	5.1201

* *PAHs: data only from 2006 and 2008.*

Concentrations mesurées par type de transport		**Voiture**	**Vélo**	**Marche**	**Métro**	**Bus**
Dioxyde d'azote NO_2	**Moyenne**	156 µg/m³	22 µg/m³	37 µg/m³	24 µg/m³	62 µg/m³
Particules en suspension PM10	**Moyenne**	60 µg/m³	38 µg/m³	43 µg/m³	292 µg/m³	75 µg/m³
Monoxyde de carbone CO	**Moyenne**	1,2 mg/m³	0,09 mg/m³	0,14 mg/m³	0 mg/m³	0,03 mg/m³
Benzène C_6H_6	**Moyenne**	5,1 µg/m³	2,1 µg/m³	0,7 µg/m³	1,9 µg/m³	3,3 µg/m³

µg/m³ microgrammes par mètre cube, mg/m³ milligramme par mètre cube

Effet de serre

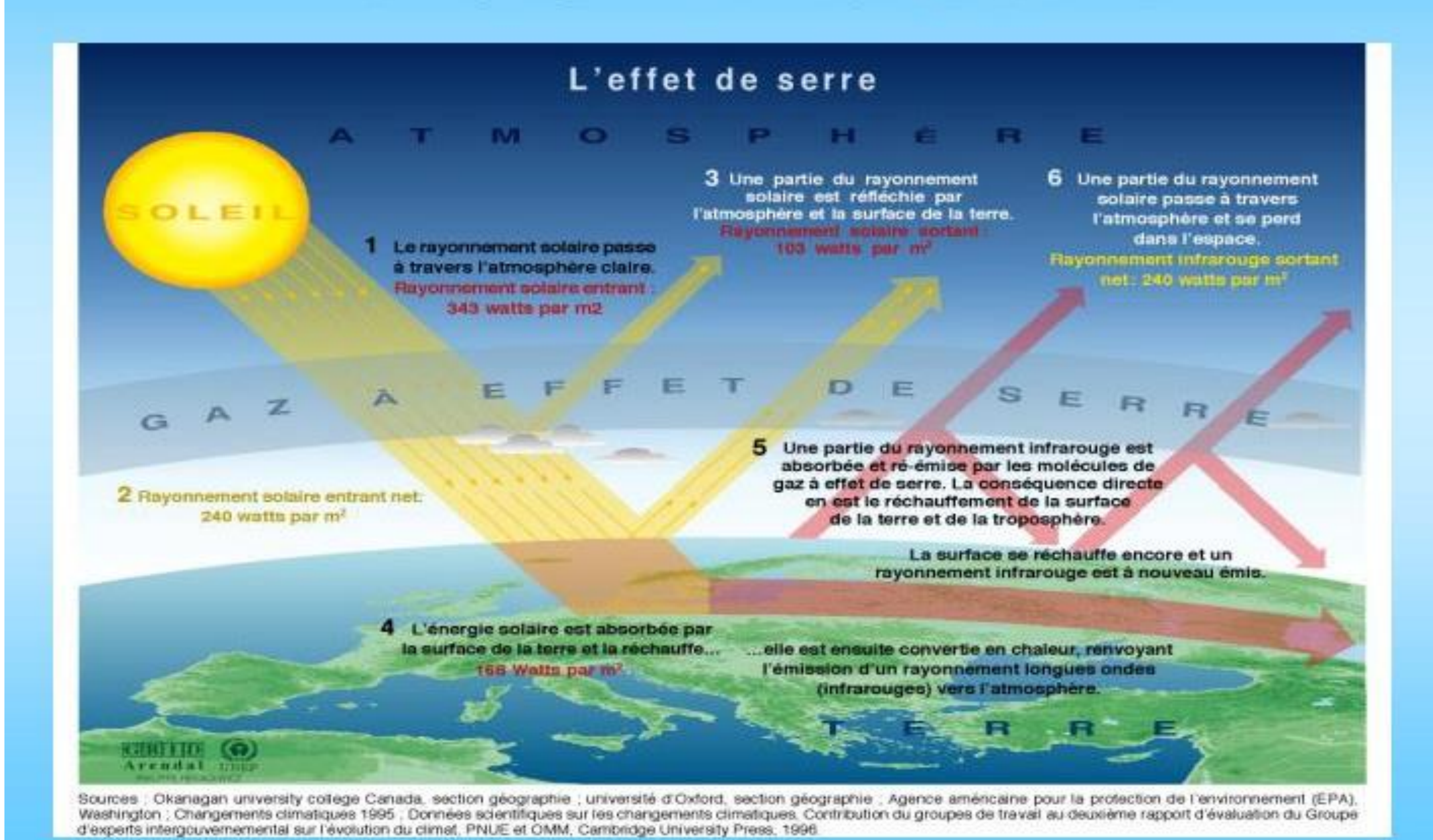
L'effet de serre est un phénomène avant tout naturel de piégeage par l'atmosphère du rayonnement de chaleur émis par la terre sous l'effet des rayons solaires. Il permet une température sur Terre bien supérieure à celle qui régnerait en son absence (+ 15°C environ au lieu de -18°C en son absence).

Le groupe de gaz responsables de ce phénomène est présent dans l'atmosphère à l'état de traces ; il s'agit, pour l'essentiel de :

La vapeur d'eau, du gaz carbonique (CO_2), du méthane (CH_4) et du protoxyde d'azote (N_2O).

C'est parce que les teneurs atmosphériques de ces gaz sont naturellement très faibles que les émissions dues aux activités humaines sont en mesure de les modifier sensiblement, entraînant, a priori, un renforcement de l'effet de serre, et par suite, des modifications possibles du climat.

Point sur l'effet de serre



Les principaux gaz à effet de serre

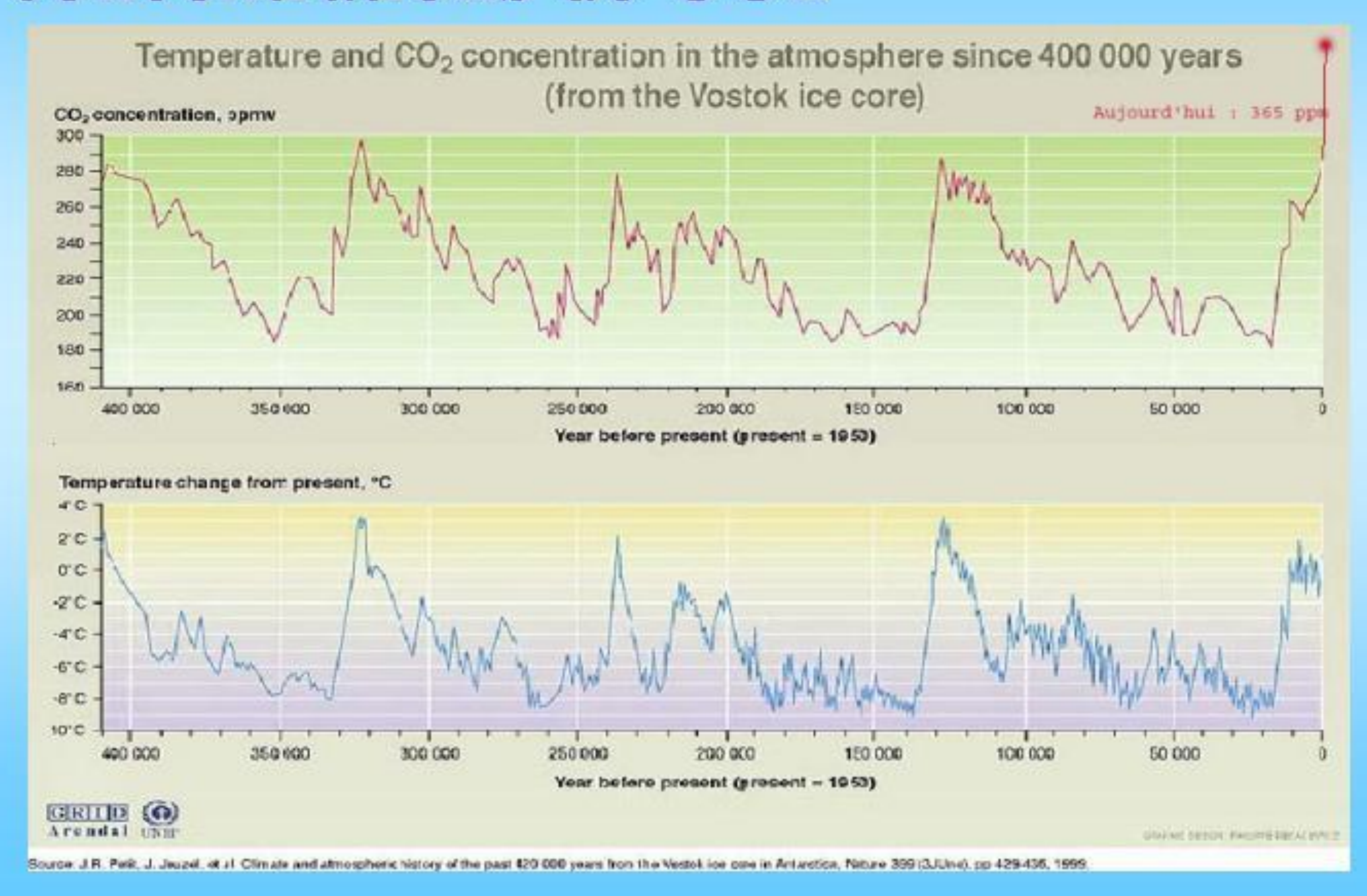
Gaz	Formule	Durée de vie	Formation du GES	PRG à 100 ans
Dioxyde de carbone	CO_2	50 - 200 ans	-Combustion -Décarbonatation	1
Méthane	CH_4	12 ans	-Fermentation (déchets, entérique) -Fuites (gaz, charbon)	23
Protoxyde d'azote	N_2O	114 ans	-Sols agricoles -Réactions chimiques	296
Gaz fluorés	HFC	HFC-23 : 260 ans	-Climatisation -Solvants	Moyenne 1 930
	PFC	CF_4 : 50 000 ans	-Procédés industriels (en part. métallurgie)	Moyenne 7 200
	SF_6	3 200 ans	-Procédés particuliers -Équipements électriques	22 200
	-Quatre gaz à effet de serre indirect : SO_2, NO_X, COVNM, CO, +CFC (protocole de Montréal)			

Effet de serre additionnel

Ozone 8 %
Gaz halogénés 13 %
N_2O 6 %
CH_4 18 %
CO_2 55 %

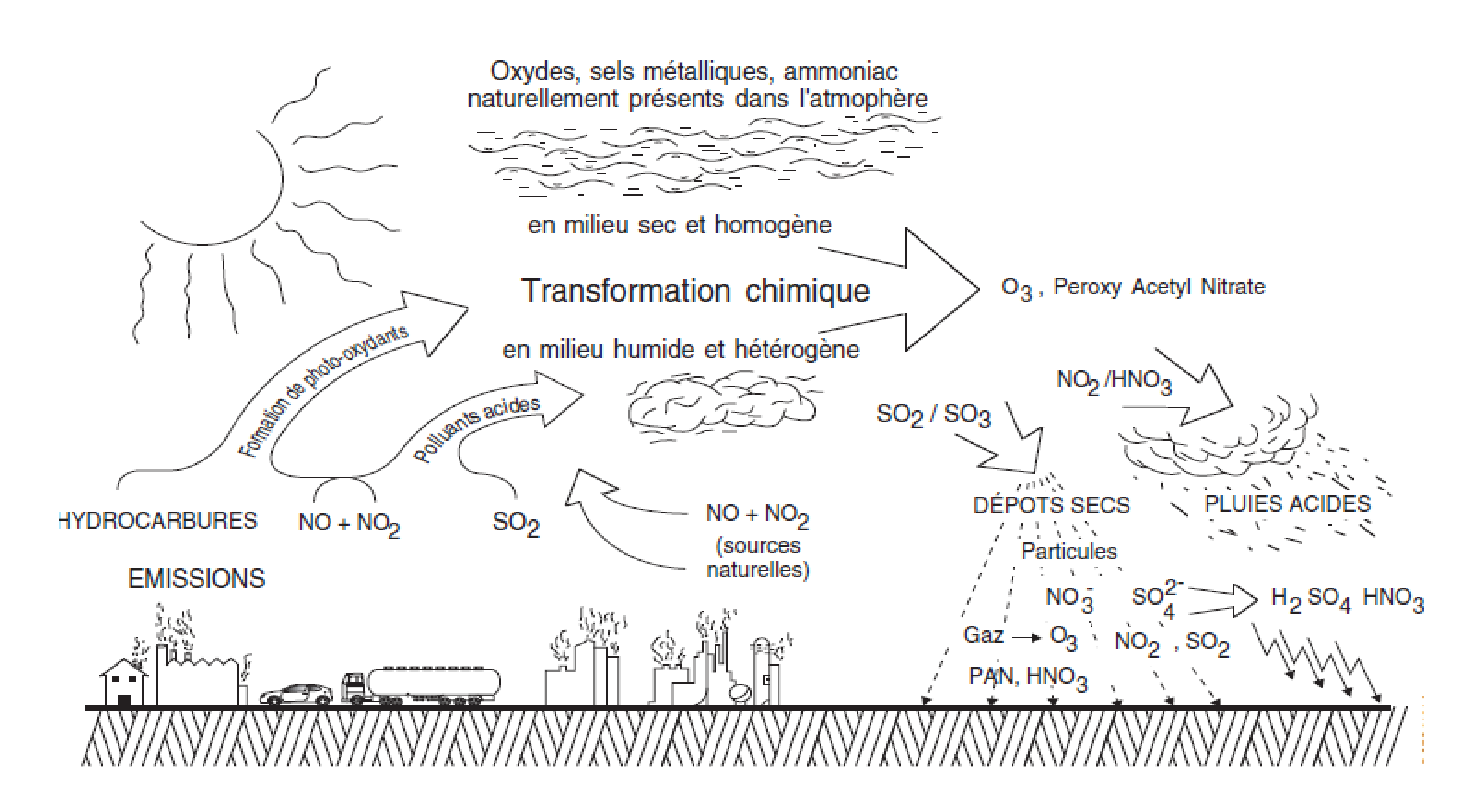
PRG : Potentiel de réchauffement Global

Constat 2: Une hausse record des concentrations de CO2

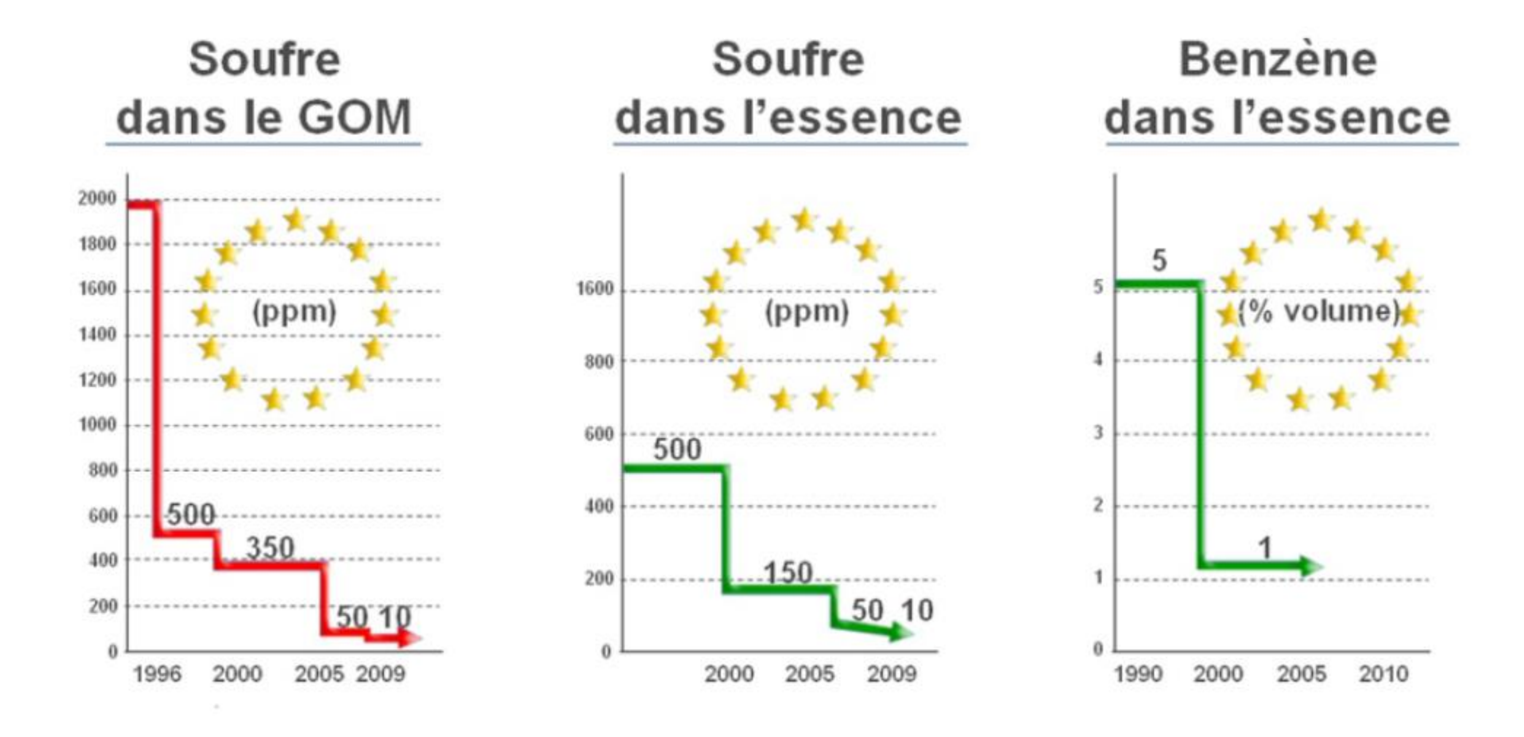


Les pluies acides

"Les pluies acides" est un terme utilisé pour décrire toute forme de précipitation acide (pluies, neige, grêles, brouillard). Le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote sont les principales causes des pluies acides. Ces polluants s'oxydent dans l'air pour former de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ou des sels. On les retrouve dans les nuages et les précipitations parfois à des milliers de kilomètres de leur point d'émission



Le soufre : Cet élément chimique est à l'origine d**es pluies acides**. Aussi, la teneur de ce corps dans les combustibles n'a cessé d'être réglementée.



Smog ou pollution photochimique

Les oxydes d'azote et les composés organiques volatils (COV) réagissent dans la troposphère, sous l'effet du rayonnement solaire, pour former des polluants photochimiques. Le principal polluant photochimique est l'ozone. Sa présence s'accompagne d'autres espèces aux propriétés acides ou oxydantes telles que des aldéhydes, des composés organiques nitrés, de l'acide nitrique, de l'eau oxygénée. Cette pollution s'observe surtout en été dans les régions périurbaines et rurales sous le vent des agglomérations, et concourt à l'accroissement de la pollution de fond par l'ozone

L'ozone et les polluants photochimiques sont également des espèces phyto-toxiques. L'ozone peut perturber la photosynthèse, altérer la résistance des végétaux, diminuer leur productivité, provoquer des lésions visibles (le tabac Bel W3 est parfois utilisé comme bio-indicateur d'ozone). La pollution à l'ozone (pics d'ozone) est liée à un excès d'ozone dans les couches basses de l'atmosphère. Cet excès est nuisible pour la santé des organismes vivants et provoque l'irritation des muqueuses chez l'homme.

Rayons solaires (énergie hn)

+

O_2 + NO + (HC) + H_2O + CO + SO_2

↓

SMOG ACIDE ET TOXIQUE

Aérosol composé de :

H_2O	SO_3 + SO_4
NO_2 et NO	HC ; aldéhydes, cétones, nitrates dont P.A.N.
O_3	

Objectifs stratégiques de l'utilisation des biocarburants

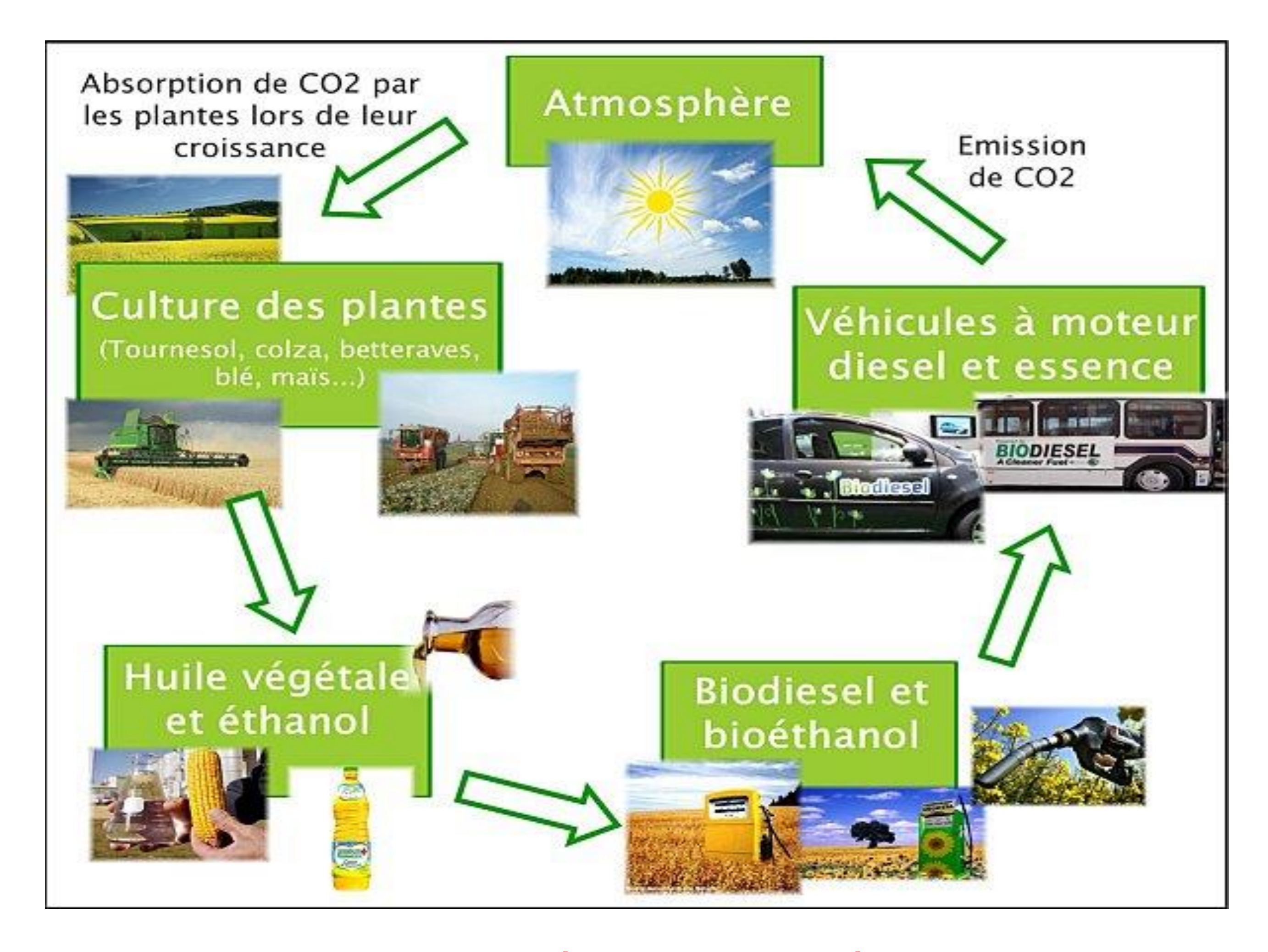
Le terme biocarburant signifie que c'est un carburant produit à partir de la biomasse, c'est à dire qu'il provient de matière organique non fossile. La matière première est d'origine animale, végétale ou provenant de déchets.

- Protéger la santé publique et l'environnement de produits toxiques et polluants
- respecter le protocole de Kyoto et maîtriser les émissions de gaz à effet de serre
- épargner et mieux utiliser l'énergie devenue chère et dont les ressources sont limitées

Les biocarburants sont :

- Des débouchés non alimentaires pour la production agricole
- Des produits de substitution des carburants pétroliers
- Des possibilités de valoriser des déchets avec un produit à haute valeur ajoutée (biogaz→bioGNV)

La **biomasse agricole** est une forme de **stockage de l’énergie** solaire sous forme d’amidon, de cellulose, de protéines, de matières grasses donc une **énergie renouvelable** « rapidement »



1t de biomasse de type bois à 35% d’humidité ≈ 1m3 ≈ 3MWh ≈ 0,25 tep

II. Biocarburants de première génération

II.1. Les sources

Les biocarburants de première génération sont produits à partir de sucres, d'amidons ou d'huiles végétales provenant de plantes comestibles. En fonction du climat, la source utilisée pour produire les biocarburants de première génération peut varier.

Pour l'exploitation des sucres, la betterave sucrière est très largement utilisée en Europe, tandis qu'il y a une forte utilisation de la canne à sucre au Brésil, où on a produit 374,25 millions tonnes en 2015, l'utilisation du maïs est également importante et, dans une moindre mesure, le sorgho doux.
L'amidon est également utilisé pour produire des biocarburants. On le retrouve dans les graines de plantes telles que les graines de blé, d'orge ou encore de riz.

Concernant l'exploitation des huiles (plantes oléagineuses) l'utilisation d'huile de colza, de soja et de palme est fortement répandue.

L'exploitation de ces « sources » d'énergies se fait sur des terres cultivables, et font donc une concurrence directe aux produits destinés à l'alimentation. Afin d’obtenir une rentabilité maximale, ces cultures sont souvent génétiquement modifiées (OGM) car elles ne sont pas soumises aux mêmes restrictions que les composés alimentaires.

II.2. Les biocarburants

II.2.1. Les biodiesels

Le biodiesel qui est un substitut du diesel.

- Filière huile pour les véhicules diesel

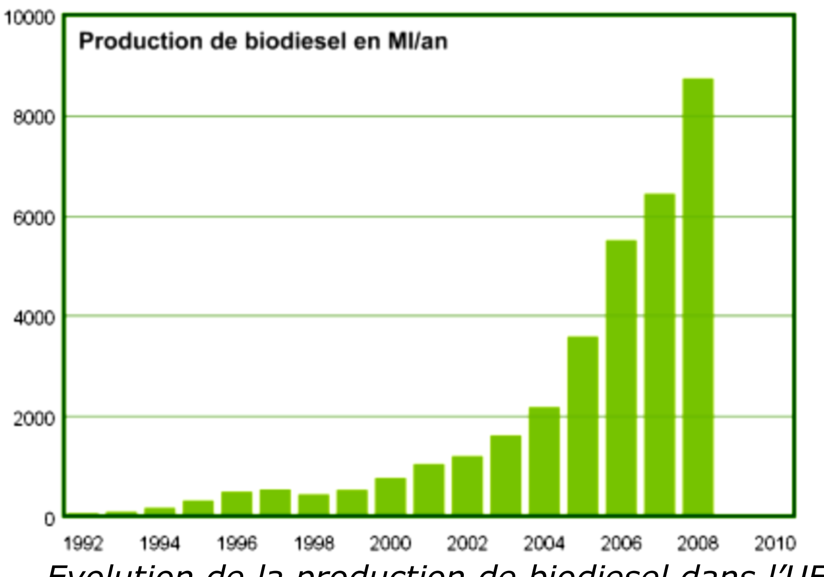
On cherche à adapter l'agrocarburant aux moteurs actuels, conçus pour fonctionner avec des dérivés du pétrole. C'est la stratégie actuellement dominante mais elle n'a pas le meilleur bilan énergétique ni environnemental.
Les huiles végétales s'obtiennent classiquement par simple pressage de graines oléagineuses telles que le colza, le tournesol, le soja, etc. Des graisses animales ainsi que des huiles alimentaires usagées peuvent également être utilisées à cet effet.

Deux grandes voies d'utilisation sont ouvertes :

- L'huile végétale brute (HVB) peut être utilisée directement, dans les moteurs diesels, pure ou en mélange, mais, notamment à cause de sa viscosité relativement élevée et d'un indice de cétane (aptitude à l'auto-inflammation) trop faible, l'utilisation d'une fraction d'huile importante nécessite l'adaptation des moteurs.

- Le biodiesel (appelé en France diester), obtenu par la transformation des triglycérides qui constituent les huiles végétales.

Le B30 est un carburant qui est dû à l'association de 30% d'EMVH (Ester Méthylénique d' Huile Végétale) et de 70% d'énergie fossile. Pour l'utiliser il faut juste faire une modification mineure sur les moteurs diesel. Il est utilisé seulement pour les transports en commun et véhicules d'entreprises.



Evolution de la production de biodiesel dans l'UE

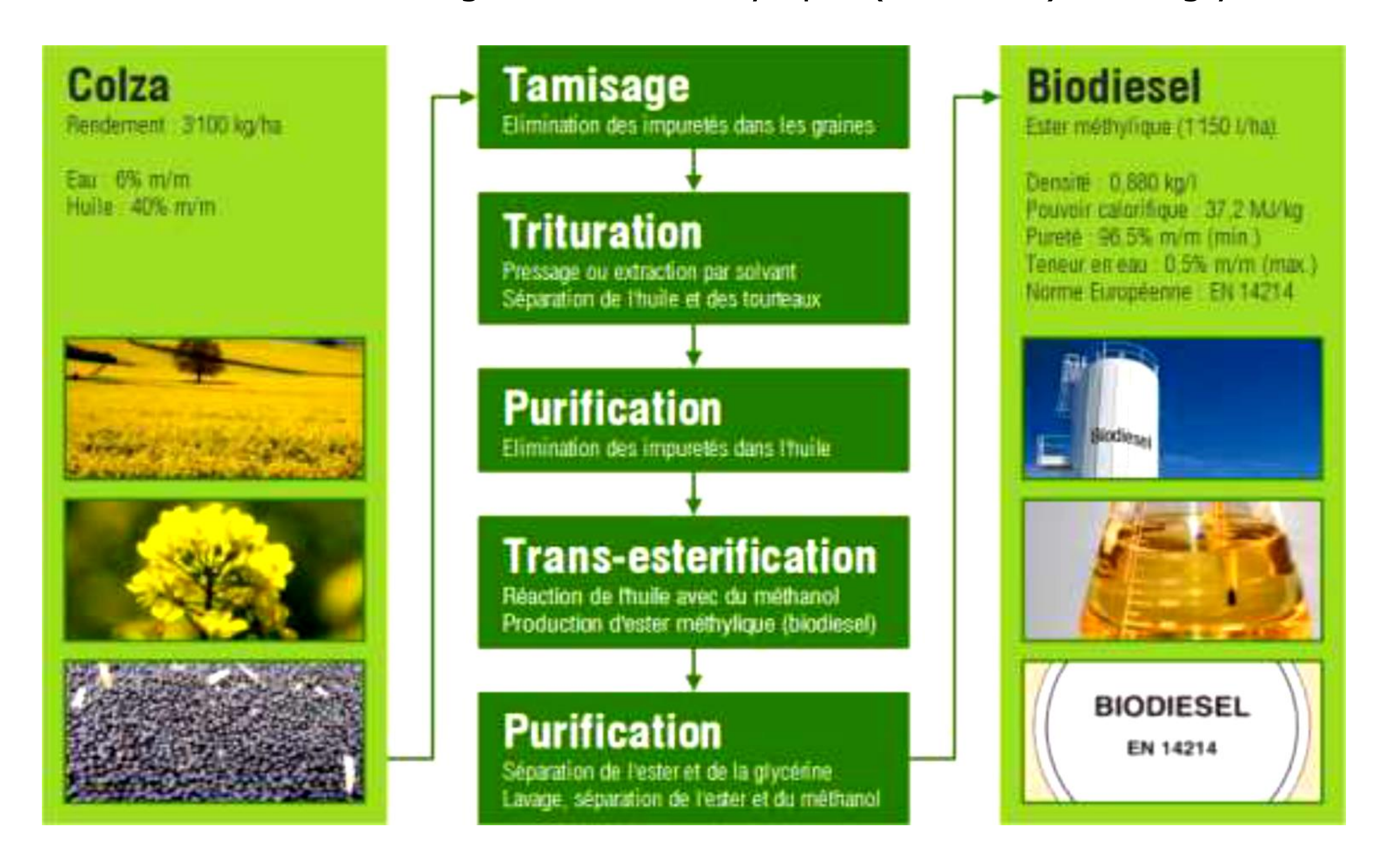
Les Procédés de conversion

Le biodiesel est produit à partir d'huile végétale (triglycéride) par une réaction chimique avec un alcool (méthanol ou éthanol) et en présence d'un catalyseur (hydroxyde de sodium NaOH ou de potassium KOH). Ce type de réaction est appelé trans-estérification produit des Esters d'Huile Végétale, respectivement méthyliques (EMHV) et éthyliques (EEHV). La réaction de transestérification est réalisée à température modérée (20-80°C) et à pression atmosphérique.

$$\text{Triglyceride} + 3\,[H_3C{-}OH] \underset{}{\overset{\text{Catalyst}}{\rightleftharpoons}} \text{Glycerol} + R_1COOCH_3 + R_2COOCH_3 + R_3COOCH_3$$

Triglyceride | Methanol (3) | Glycerol | Methyl Esters

La trans-estérification va former un mélange d'ester méthylique (biodiesel) et de glycérol.



Les propriétés physiques des esters méthyliques ou éthyliques ressemblent fortement à celles du diesel.

	T de fusion (°C)	Viscosité (Cst)	densité	Indice de Cétane	PCI (kJ/L)
Gasoil	-12	4,2	0.84	48 / 52	37635
EMVH	/	7	0.88	49 /50	33024
HVP (Colza)	< 2	98	0.92	32 / 36	36607

- Rendement colza : 35 q/Ha à 40% d'huile; 1,4 T/Ha d'huile
- Productivité : 1,4 T/Ha EMHV (colza) ; 1,96 T/Ha tourteaux

II.2.2. Les bioéthanols

Le bioéthanol qui est un substitut de l'essence.

Il est produit par fermentation du sucre provenant des cultures sucrières (canne à sucre, betteraves, blé), ou provenant des cultures contenant de l'amidon (graines).

- Filière alcool pour les véhicules à essence

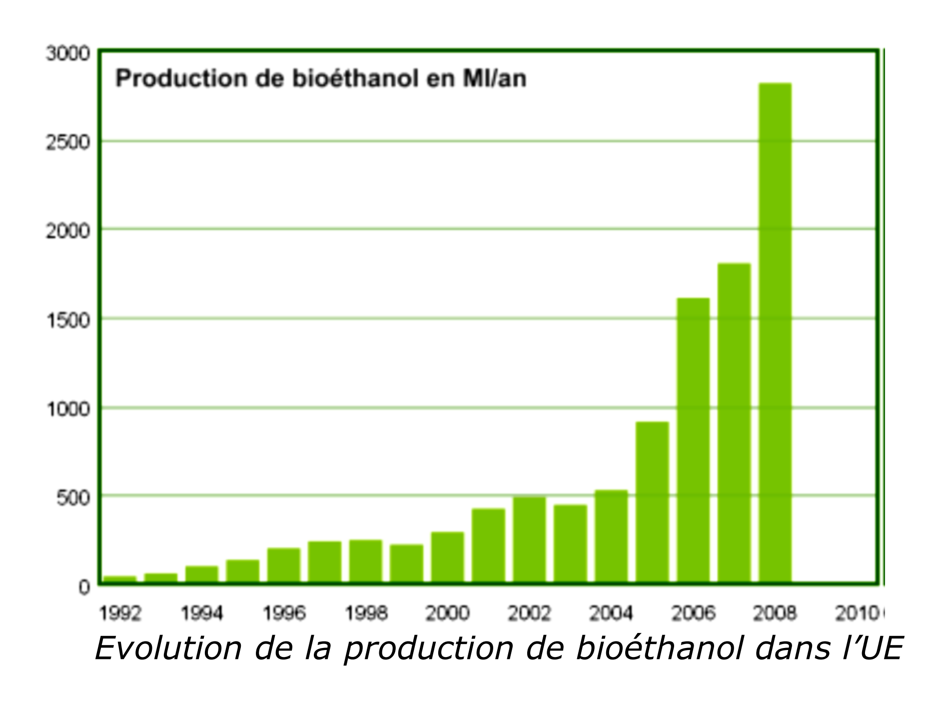
- L'éthanol peut remplacer partiellement ou totalement l'essence. Il existe plusieurs types de carburants contenant de l'éthanol la plupart sont des mélanges d'essence et d'éthanol à différentes proportions. On les désigne par la lettre E suivie du pourcentage d'éthanol dans le mélange : Par exemple du E85 représente un carburant contenant 85% d'éthanol et 15% d'essence. On trouve ainsi du E5, E7, E10, E15, E20, E85, E95, E100 en fonction du pays dans lequel on se trouve et de l'utilisation que l'on veut en faire.

- L'éthyl-tertio-butyl-éther (ETBE) est un dérivé de l'éthanol. Il est obtenu par réaction entre l'éthanol et l'isobutène (obtenu lors du raffinage du pétrole) et est utilisé comme additif à hauteur de 15 % à l'essence.
  L'ETBE aurait l'avantage d'être mieux adapté aux moteurs. En effet, l'incorporation directe de l'éthanol à l'essence pose certaines difficultés techniques : le mélange essence/éthanol a une pression de vapeur plus élevée et tolère mal la présence de traces d'eau. Néanmoins, l'ETBE est moins vertueux pour l'environnement, d'où le choix de nombreux autres pays pour l'E85.

  On utilise d'autres additifs oxygénés pour l'amélioration de l'indice d'octane des essences comme : MTBE, TAME (TerAmylMéthylEther), TBA (alcool TertioButylique)

- Le biobutanol (ou alcool butylique) est obtenu grâce à la bactérie Clostridium acetobutylicum qui possède un équipement enzymatique lui permettant de transformer les sucres en butanol-1 (fermentation acétonobutylique). Du dihydrogène, et d'autres molécules sont également produites : acide acétique, acide propionique, acétone, isopropanol et éthanol.

Les entreprises BP et DuPont commercialisent actuellement le biobutanol ; il présente de nombreux avantages par rapport à l'éthanol (moins volatile et moins agressif vis-à-vis de certains plastiques) et est de plus en plus souvent évoqué comme biocarburant de substitution à l'heure du pétrole cher. Il n’est pour l’instant pas distribué en Europe.



Evolution de la production de bioéthanol dans l’UE

Les Procédés de conversion

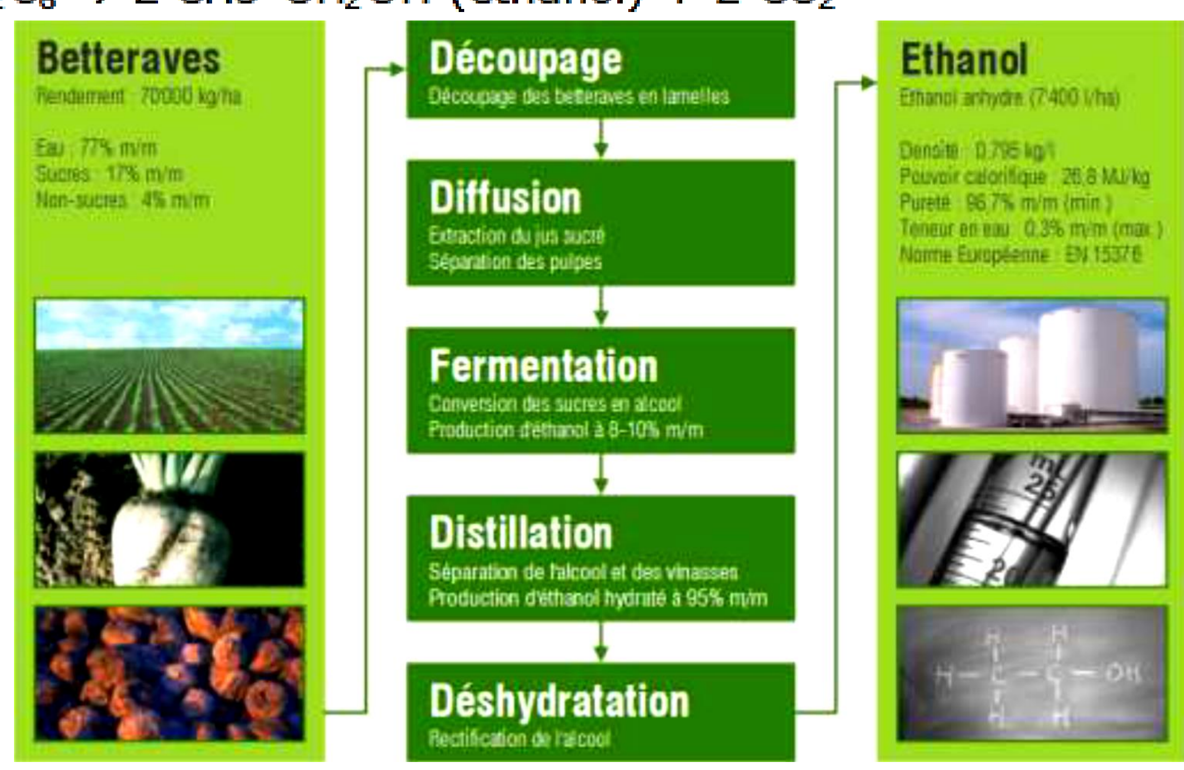
La structure de l'amidon est une longue chaîne de polymère de glucose. Ce polymère ne peut pas être fermenté directement, la structure doit d'abord être cassée en des molécules de glucoses plus petites puis dissoute dans de l'eau pour avoir une teneur en amidon entre 15 et 20 %. Ce mélange est ensuite chauffé et traité avec une enzyme.

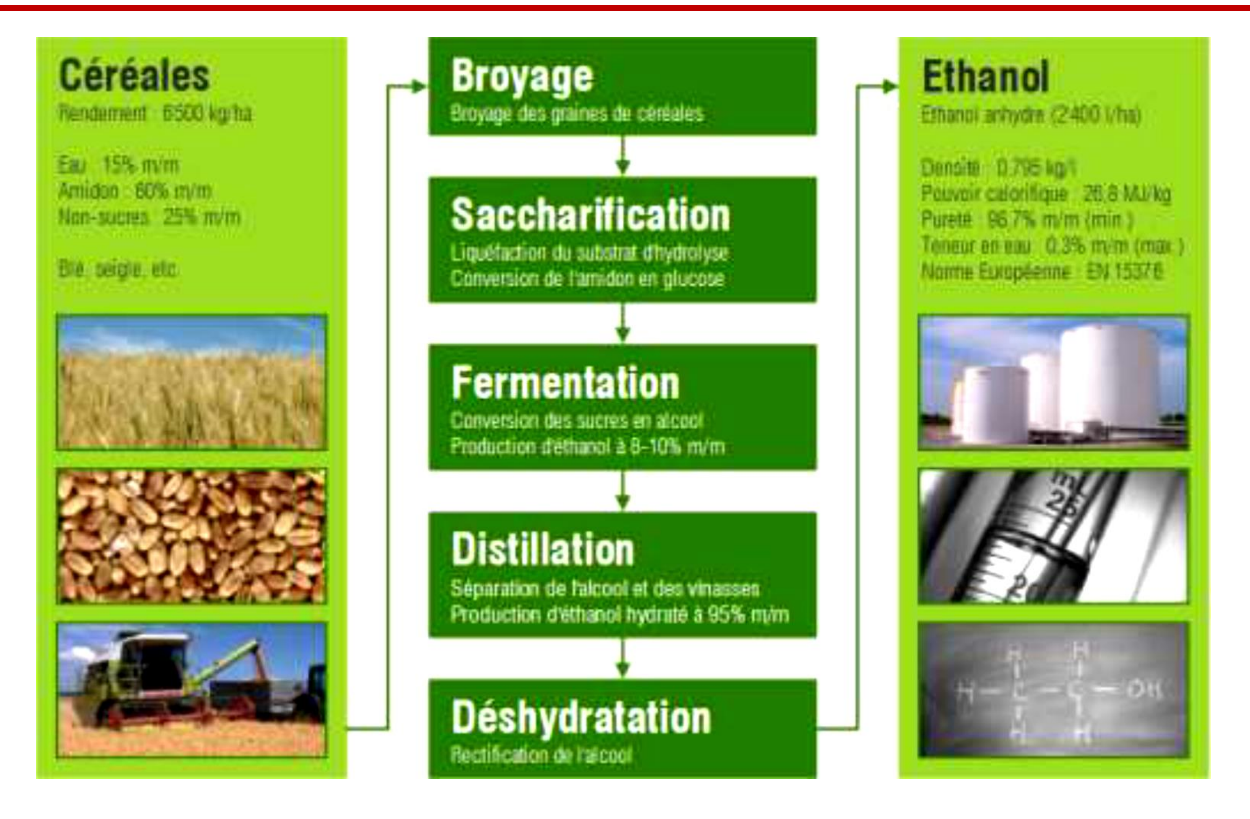
Cette enzyme permet d'hydrolyser l'amidon en chaîne courte de glucose et est appelée amylase (enzyme digestive).

$$\underset{\text{Amidon}}{(C_6H_{10}O_5)_n} + n\,H_2O \xrightarrow{\text{Eau}} n\,\underset{\text{Glucose}}{C_6H_{12}O_6}$$

La fermentation transforme alors les sucres ou l'amidon en éthanol et en dioxyde de carbone grâce à des levures telle que la Saccharomyces. En théorie 51% du glucose est convertie en éthanol, le reste est utilisé par la levure comme source d'énergie ce qui diminue l'efficacité de 40 à 48%.

$$C_6H_{12}O_6 \text{ (Glucose)} \rightarrow CH_3\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}CH_2OH \text{ (n-Butanol)} + 2\,CO_2 + H_2O$$
$$C_6H_{12}O_6 + H_2O \rightarrow CH_3\text{-}CO\text{-}CH_3 \text{ (acetone)} + 3\,CO_2 + 4\,H_2$$
$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\,CH3\text{-}CH_2OH \text{ (éthanol)} + 2\,CO_2$$





Propriété	Essence	Butanol	Méthanol	Ethanol	TBA	ETBE	MTBE	TAME
Masse vol (kg/m^3)	755	810	796	794	792	750	746	750
Temp. Ebullition (°C)	0 -220	117	64,7	78,3	82,8	72,8	55,3	86,3
PVR (bars)	0,35–0,9	0,006	0,32	0,16	0,12	0,40	0,54	0,10
PCI (kJ/L)	32389	29200	15810	21283	25790	26910	26260	27375
RON	91 - 96	96	126	120	113	117	118	114
MON	81 - 88	78	96	99	100	101	101	100
Rapport air/carb	14,7	11,1	6,4	8,95	11,1	12,1	11,7	12,1
Chaleur de vaporisation (kJ/kg)	360	430	1100	854	510	321	337	310

- Environ 85% de l'éthanol est transformé en ETBE
- Productivité : blé 2,55 T/Ha éthanol ; betterave 5,78 T/Ha éthanol

II.2.3. Les biogaz

Le biogaz ou bio-méthane qui peut être produit à partir de la digestion du fumier liquide, lisier, purin et d'autres types d'alimentations digestes.

C’est un processus de digestion anaérobique (sans présence d'oxygène) par les micro-organismes qui vivent dans ces milieux. Le schéma montre le processus de méthanisation et les différents microorganismes impliqués.

L'intérêt de la méthanisation en milieu anaérobie est qu'il n'y a pas besoin d'un apport d'oxygène ce qui permet une économie d'énergie. Cependant, le rendement de dégradation est plus faible qu’en milieu aérobie.

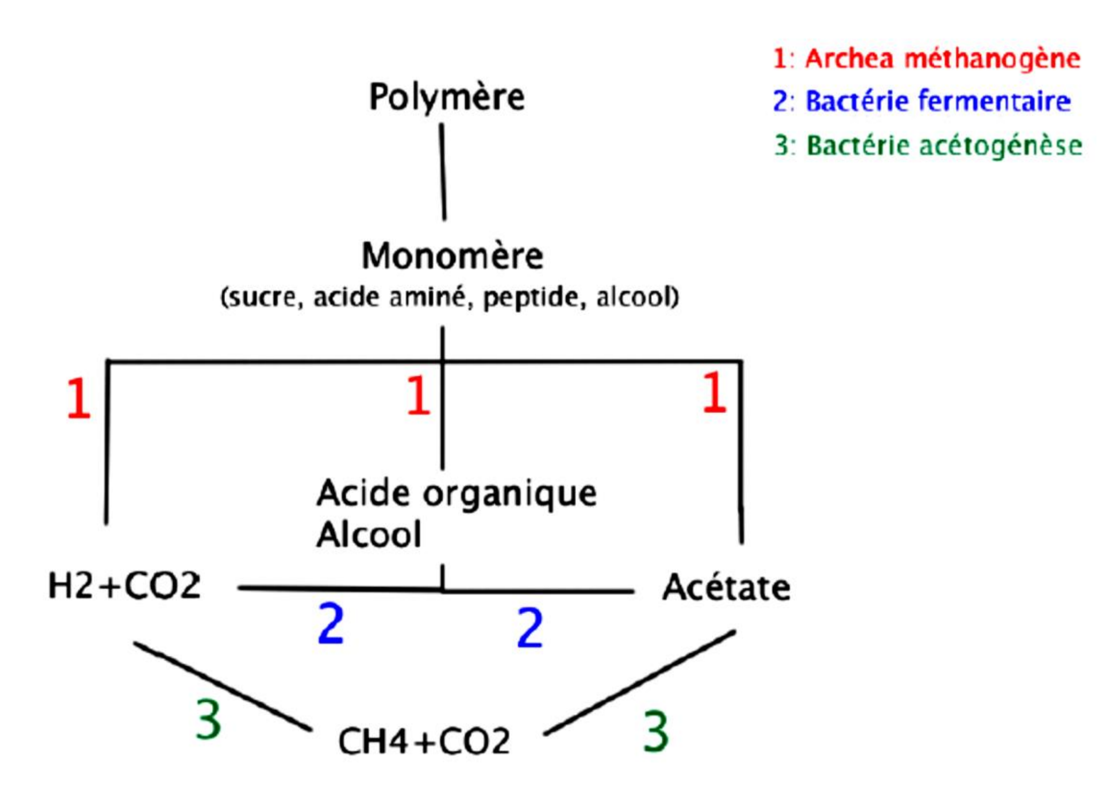


Figure 1 : Processus de méthanisation

Les Procédés de conversion

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO2$$

$$CO_2 + 4\ H_2 \rightarrow CH_4 + 2\ H_2O$$

Composition moyenne du biogaz (AEBIOM 2009)

Gaz	% Volume
CH_4	55 -75
CO_2	25 – 45
H_2S	0 – 1.5
NH_3	0.05

Pour être utilisé comme biocarburant ou injecté dans le réseau de gaz naturel, le biogaz obtenu doit être purifié pour enlever les polluants tels que H2S et le CO2, les poussières et autres particules. On obtient alors du biométhane, gaz dont la concentration en méthane est fortement augmentée (~98%)

Caractéristiques physico-chimiques du biométhane

Formule chimique	CH4
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/L)	6,5
Pouvoir calorifique Inférieur (MJ/Kg)	48,5
Densité (kg/L)	0,1359
Productivité (m3 de méthane/ tonne matière sèche)	200 - 400
Nombre Cétane	130
Type de moteur Moteur	CNG

Enfin, pour être utilisé comme carburant, le biométhane doit être comprimé entre 200 et 250 bars.

III. Biocarburants de La deuxième génération

III.1. Les sources

Les biocarburants de deuxième génération proviennent essentiellement de sources lignocellulosiques. Ce sont les matières les plus abondantes disponibles dans les plantes qui, par ailleurs, ne sont pas comestibles.

La ligno-cellulose est composée de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. La cellulose est une chaîne linéaire constituée de deux sucres à 6 atomes de carbone (C6), le glucose et le pyranose. L'association des chaînes de cellulose constitue des microfibrilles rigides et insolubles. Les hémicelluloses sont constituées de différents types de sucres disposés en chaînes linéaires ou ramifiées. Ces sucres sont des pentoses (C5, à savoir xylose et arabinose) et des hexoses (C6, à savoir glucose, galactose et mannose). La lignine est issue de la condensation de l'alcool coumarylique, de l'alcool coniférylique et de l'alcool sinapylique. Ces trois constituants interagissent pour former une matrice rigide dont la composition n'est pas uniforme.
Bien que présents en proportions variables selon la plante, on considère cependant que les matériaux lignocellulosiques contiennent environ entre 40 à 60 % de cellulose, 20 à 40 % d'hémicelluloses et 10 à 25 % de lignines. Ensemble, ces composants représentent près de 90 % de la matière sèche de la plupart des matières lignocellulosiques. Les 10 % restant étant constitués de minéraux inorganiques et d'extractibles organiques (alcaloïdes, terpènes, cires, composés phénoliques, saponines, etc.).
La biomasse lignocellulosique comprend le bois, la paille, le miscanthus… et peut être issu de l'industrie forestière, du secteur agricole (cultures dédiées ou résidus) ou de déchets ménagers et agroindustriels.

Ces ressources peuvent être réparties en trois catégories :

- les cultures telles que le peuplier, le saule, l'eucalyptus ;
- les graminées pérennes (miscanthus, herbes) ;
- les résidus de l'industrie du bois et de l'agriculture (tiges, tronc d'arbres).

La biomasse ligno-cellulosique est divisée en trois types de structures :

• La **cellulose** (polymère de glucose cristallin), c'est la matière organique la plus abondante sur la Terre (50% de la biomasse)

Structure de la cellulose

• **L'hémicellulose** (polymère formé de xylose, de mannose, de glucose et de galactose)

Structure de l'hemicellulose

• La **lignine** (composé de poly-aromatique, diffère en fonction de l'environnement)

Structure de la lignine

III.2. Les biocarburants

Les biocarburants produits à l'aide de la deuxième génération sont identiques à ceux produits avec la première génération. On y retrouve les bioéthanols synthétisés à partir du sucre extrait de la source ligno-cellulosique et également les biogaz produits à partir du gaz de synthèse et transformés soit en hydrocarbure (biodiesel, kérosène, bio-SNG (Synthétique Natural Gas)), soit en méthane (Bio-DME (Diméthyle Ester)).

III.3. Procédés de conversion

Deux voies permettent de transformer la biomasse de seconde génération en biocarburant. Il est possible de passer par un processus thermochimique ou par un processus biochimique.

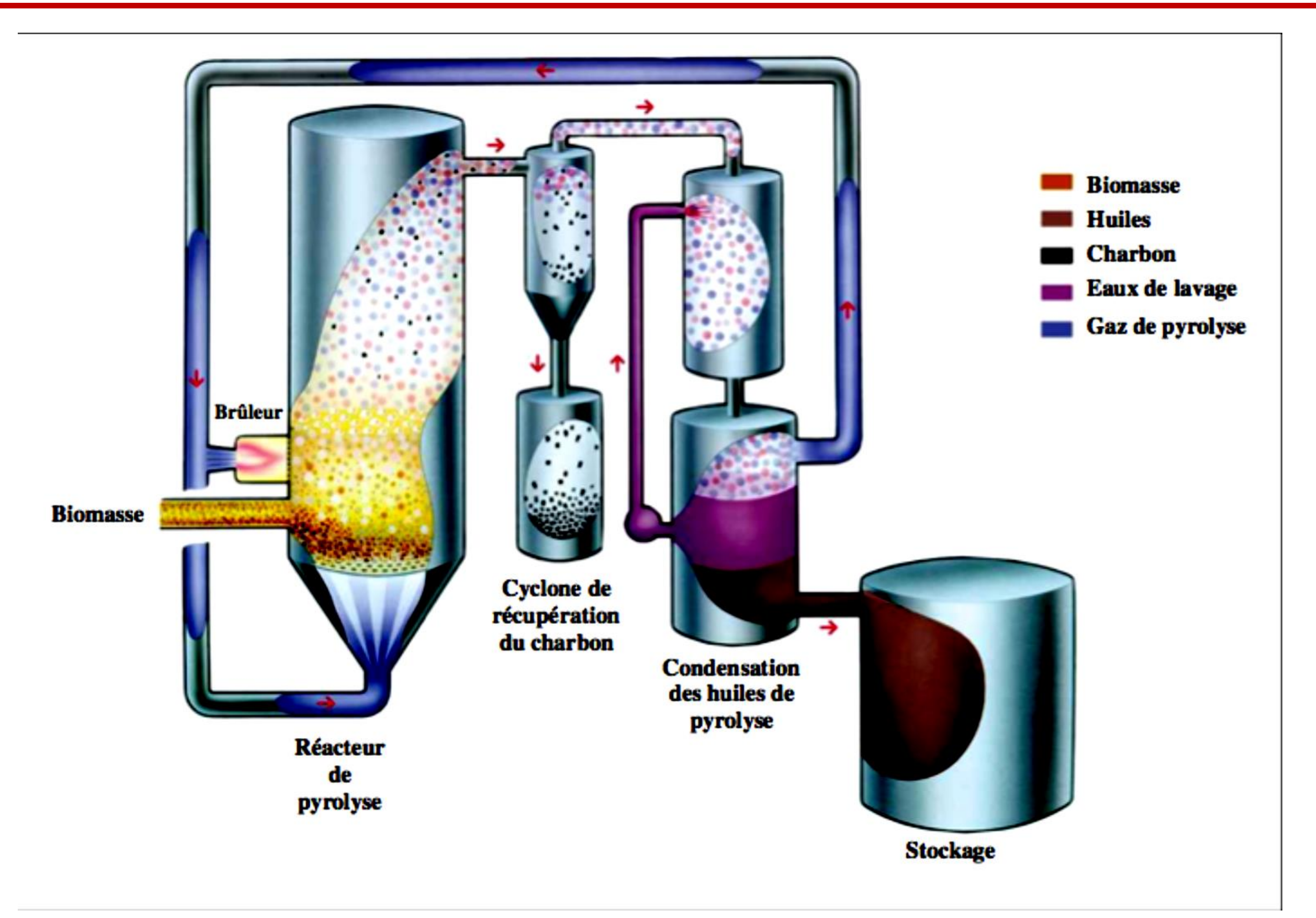
III.3.1. Processus thermochimique

Le processus thermochimique est la conversion de la biomasse en biocarburant sans présence de micro-organisme. L'avantage de ce processus est qu'il convertit tous les composants organiques de la biomasse. Cette conversion inclue :

• **la liquéfaction :** Le principe de la liquéfaction est de mettre en solution la biomasse à l'aide d'un solvant aqueux (eau) ou organique (coupes aromatiques pétrolières).
La liquéfaction se fait en général sous pression de 150 à 200 bars et se produit sous atmosphère réductrice (en présence de H2 et de CO). En plus de la biomasse, on peut rajouter un catalyseur (les plus intéressants sont les métaux alcalins, les alcalinoterreux sous forme de carbonates) et ainsi permettre un meilleur rendement de l'ordre de 63%.

La liquéfaction transforme la biomasse en biocarburant liquide et gazeux.

• **la pyrolyse :** La pyrolyse est la dégradation thermique de la biomasse par chauffage en absence d'oxygène. La pyrolyse produit du charbon et des huiles qui permettent la production de biocarburants. Le gaz produit lors de cette pyrolyse est utilisé pour produire la chaleur utile pour la pyrolyse.
Le schéma ci-dessous montre le principe de la pyrolyse.

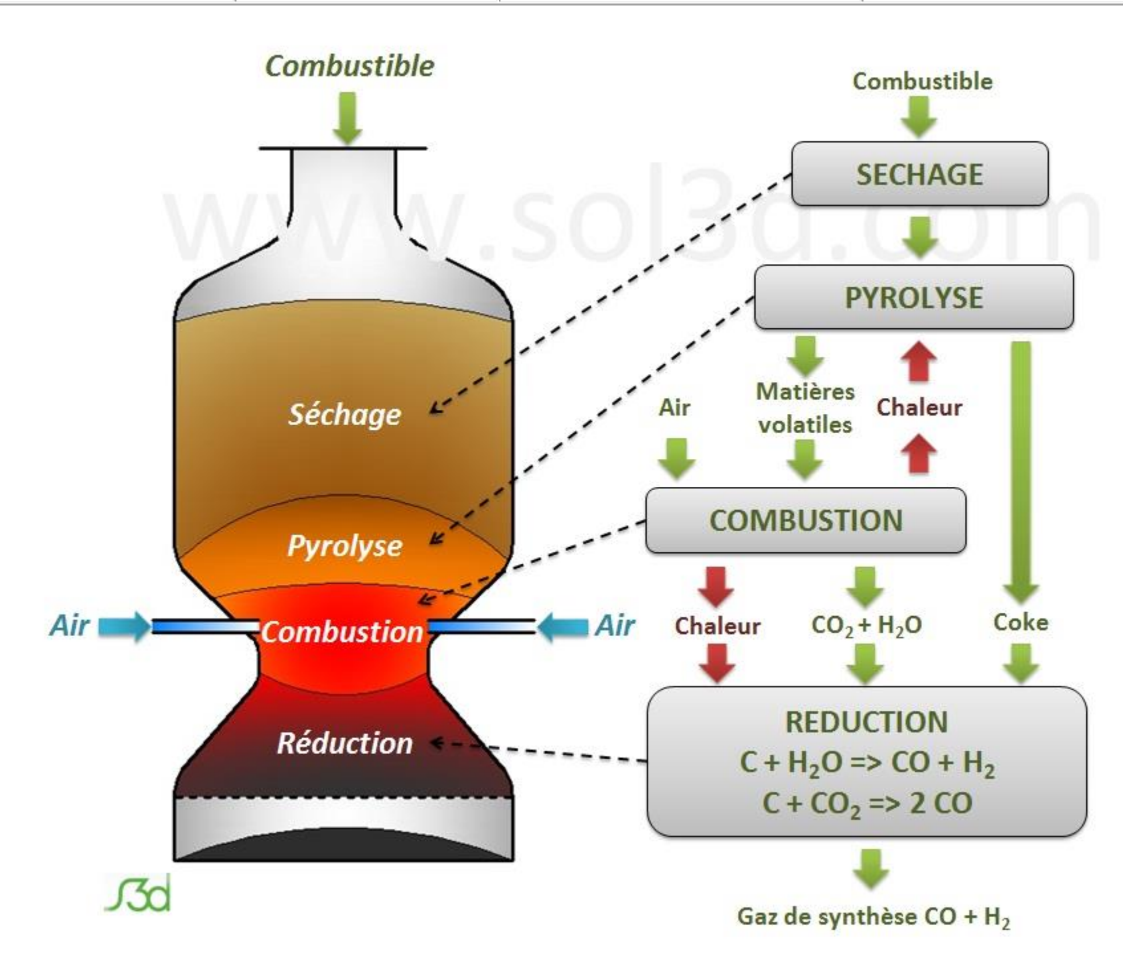


Sous l'effet du chauffage, entre 300 et 700 °C, des matières volatiles se forment à partir de l'hydrogène, de l'oxygène et du carbone présents dans le combustible solide, puis sont évacuées. La biomasse se transforme alors, d’une part, en une partie solide appelée le « coke » (charbon) et, d’autre part, en une partie gazeuse (gaz de pyrolyse) constituée de gaz condensables (eau, goudrons) et de gaz incondensables (CO, CO2, H2, CH4).

On distingue trois types de pyrolyse différents en fonction de leur gamme de températures et de leur vitesse de chauffe.

Différents types de pyrolyse

Type	***Niveaux de température***	***Vitesse de chauffe***	***Temps de résidence Solide (s)***	***Produits majoritaires***
Pyrolyse lente	400-600°C	1-10°C/min	450-500	Coke (30-40%), huile(~30%) Volatiles (~35%)
Pyrolyse rapide	600-800°C	10-50°C/min	0,5 -10	Volatiles (~30%), huile(~50%) Coke (20-25%)
Pyrolyse flash	600-900°C	>50°C/min	< 0,5	Volatiles (~13%), huile(~75%) Coke (10-20%)



• **la combustion :** C'est la réaction chimique entre le carburant et l'oxygène, il en résulte de l'eau et du dioxyde de carbone. La combustion de la biomasse doit être effectuée dans un endroit bien ventilé. Cette combustion va permettre de produire de l'électricité directement.

• **la gazéification :** La gazéification est la transformation de la biomasse en présence d'oxygène, de vapeur d'eau et d'hydrogène. Cette technique va produire un mélange de gaz appelé gaz de synthèse (CO, CO_2, H_2, CH_4, N_2).
Un catalyseur peut être utilisé pour la transformation de la biomasse en gaz de synthèse. On peut utiliser un catalyseur pour réduire la température du procédé (900°C), en l'absence de catalyseur la transformation se déroule à haute température (1300°C). La différence avec la pyrolyse réside essentiellement par la présence de gaz de réaction (O_2, H_2O...).

III.3.2. Processus biochimique

Les voies de conversion biochimiques présentent cependant l'avantage de se dérouler à des températures inférieures à celles utilisées dans les voies thermochimiques et peuvent offrir de plus hautes sélectivités quant aux produits obtenus.
Comme pour la première génération, ce procédé permet, par fermentation des sucres, de produire de l'éthanol. Cependant la source ligno-cellulosique ne fournit pas directement le sucre exploité. Une étape de plus est nécessaire pour produire du bioéthanol.
Cette cellulose va être transformée en glucose par hydrolyse grâce à des enzymes produits par des micro-organismes tel que le *trichoderma reesi*. Le glucose va ensuite pouvoir être fermenté pour former de l'éthanol selon la même technique que lors de la première génération.
Enfin on déshydrate et distille l'éthanol pour le purifier.

La première étape constitue le prétraitement et permet d'isoler la cellulose des autres constituants de la biomasse.

❖ *Prétraitements de la biomasse lignocellulosique.*

Afin de faciliter le(s) prétraitement(s) de la biomasse lignocellulosique, différentes mises en forme du substrat peuvent être opérées. Citons par exemple le broyage, le découpage, la défibrillation ou la micronisation.

La structure cristalline et la présence de lignines protègent la cellulose de l'hydrolyse chimique ou enzymatique, rendant celle-ci lente et incomplète. Afin d'avoir une hydrolyse effective, il est nécessaire de prétraiter le matériel lignocellulosique afin de séparer et rendre accessible les constituants intimement liés de la biomasse lignocellulosique : cellulose, hémicelluloses et lignines.

Plusieurs types de prétraitements permettent le fractionnement des matériaux lignocellulosiques : prétraitements mécaniques, prétraitements acides et alcalins, vapocraquage, steam explosion, traitement haute pression, etc.

Le but étant de préparer l'hydrolyse de ces composés en évitant de perdre ou de dégrader les sucres.

Tableau 2. Principaux procédés de prétraitement de la biomasse lignocellulosique — *Main pretreatment processes of lignocellulosic biomass.*

Procédés physiques	Prétraitement mécanique	Broyage (< 2 mm)
	Thermolyse	250-300 °C
Procédés physico-chimiques	Thermohydrolyse	H_2O, 200-230 °C, 50 bar
	Explosion à la vapeur	180-270 °C, 10-50 bar
	Explosion à la vapeur en conditions acides	H_2SO_4 0.1N
	Explosion à la vapeur en présence d'ammoniaque	NH_4OH, 50-90 °C, 30 min.
	Explosion au dioxyde de carbone	CO_2
Procédés chimiques	Prétraitement à l'acide dilué	100-200 °C, acide dilué 1 %
	Prétraitement alcalin	80-120 °C, NaOH 10 %
	Procédé Organosolv	Solvant, 150-200 °C
	Oxydation chimique	Ozone
	Oxydation biologique	Peroxydase

❖ *L'hydrolyse acide et enzymatique de la cellulose.*

La cellulose naturelle est peu soluble dans les solvants conventionnels et est très résistante aux hydrolyses et aux transformations chimiques et biochimiques.

Cependant, l'hydrolyse des matériaux lignocellulosiques au moyen d'acide dilué est une des plus anciennes technologies pour convertir la biomasse en carbohydrates. Typiquement, une solution aqueuse d'acide sulfurique 1 % est utilisée. Par ailleurs, depuis 1883 déjà, l'aptitude à dissoudre et hydrolyser la cellulose native en utilisant de l'acide sulfurique concentré et ensuite en diluant avec de l'eau a été rapportée. L'acide concentré casse les liaisons hydrogène, convertissant la cellulose en un matériau amorphe qui est alors hydrolysé.

À l'heure actuelle, l'hydrolyse acide de la cellulose présente un regain d'intérêt suite au développement de catalyseurs acides solides ou supportés.

Une option alternative attractive pour hydrolyser la cellulose est l'emploi d'enzymes. Celles responsables de l'hydrolyse de la cellulose portent le terme générique de cellulases. Elles peuvent être produites par des bactéries (actinomycètes), des protozoaires, des insectes, des mollusques et des champignons. Ces derniers sont les plus faciles à exploiter car ils se développent directement sur des substrats simples (cellulose pure, sciures de bois, etc.) et les enzymes sont sécrétés dans un milieu de culture, ce qui les rend facilement isolables par centrifugation et filtration.

De nombreux facteurs interviennent dans l'hydrolyse enzymatique de la cellulose. Citons entre autres les propriétés physico-chimiques du substrat (origine, prétraitements utilisés, degré de polymérisation et de cristallinité, surface spécifique et porosité, etc.), la nature des cellulases (type, mélange et synergie entre cellulases, absorption et désorption, inhibition, etc.) et les conditions opératoires (température, pH, transfert de masse lié à l'agitation, force ionique du milieu, présence de certains éléments). Différents types de cellulases interviennent lors de la dépolymérisation de la cellulose (Figure 7):

Récapitulatif des deux processus et les types d'énergies produites à l'aide de ces deux voies.

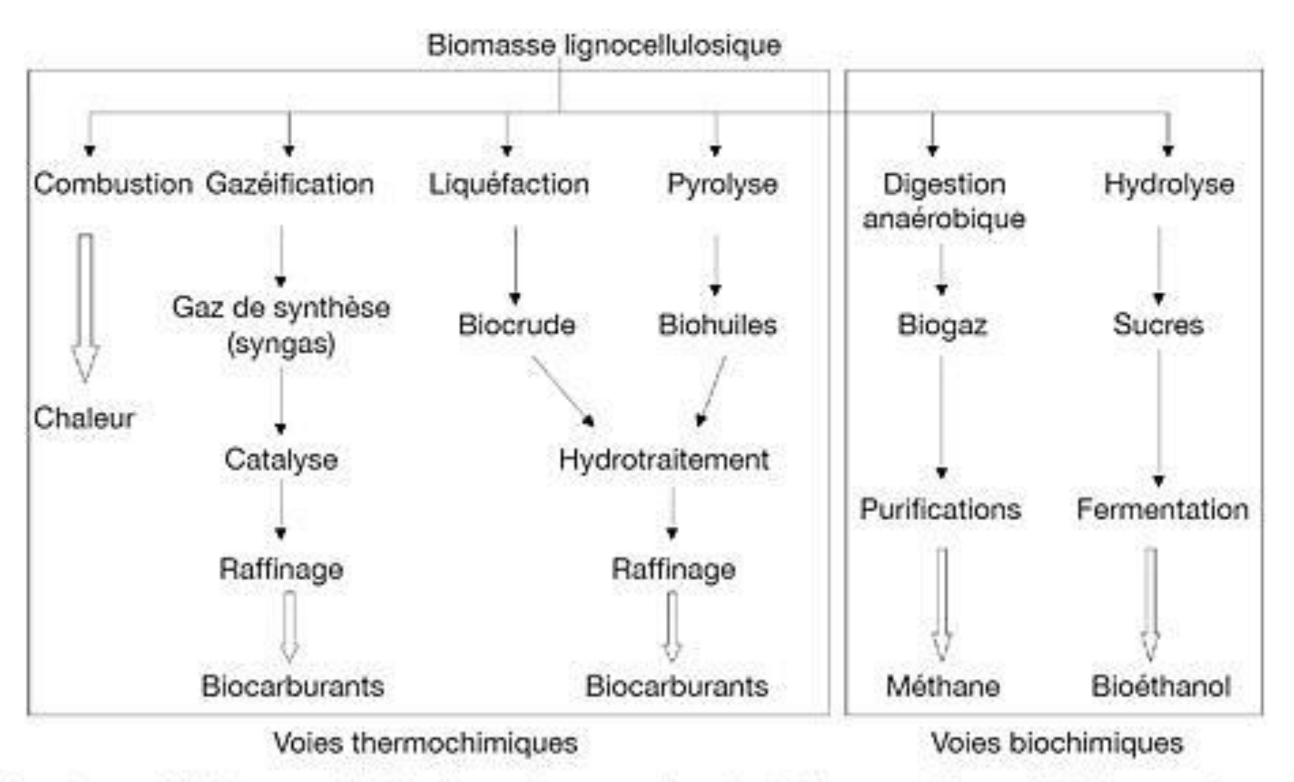
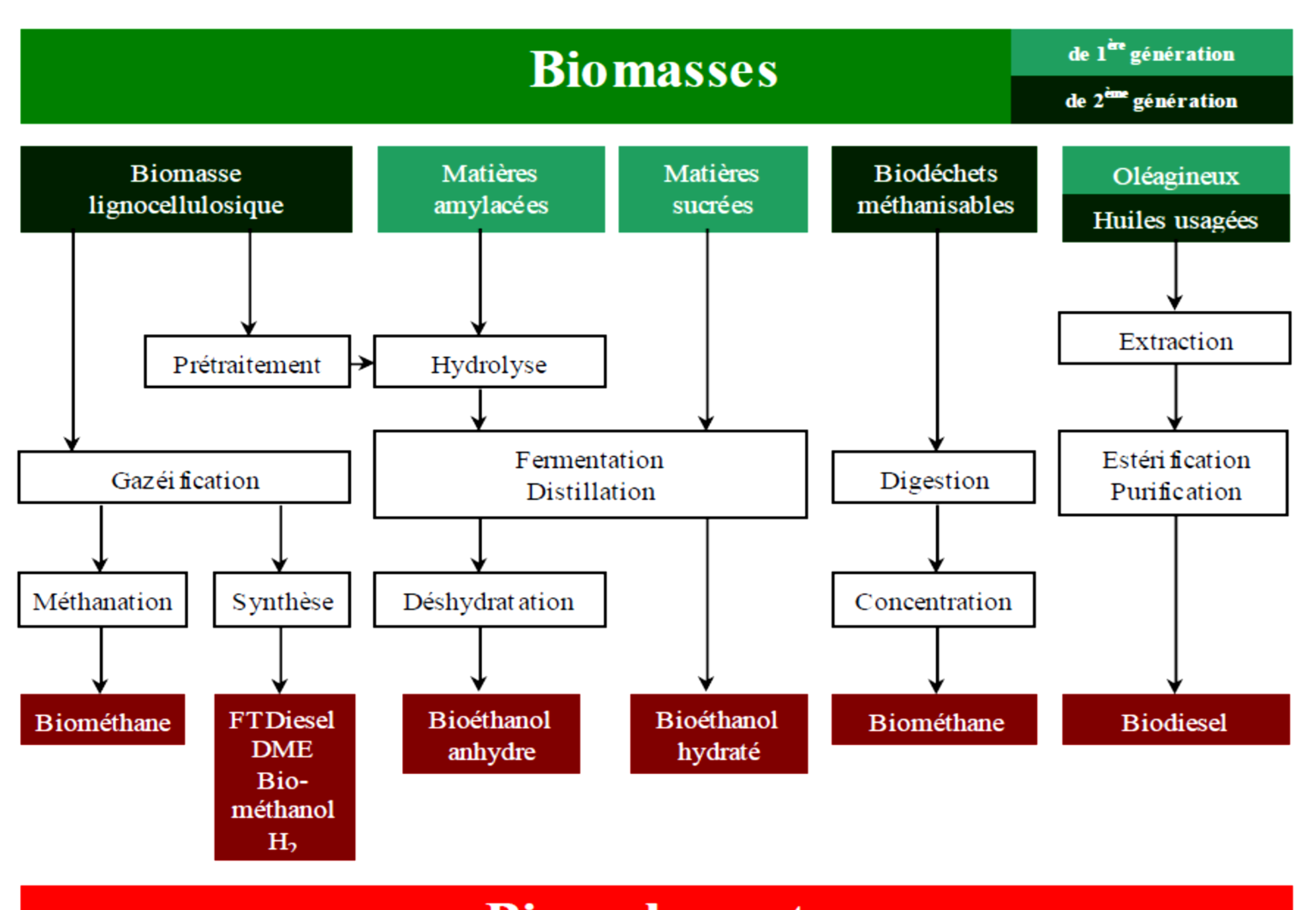


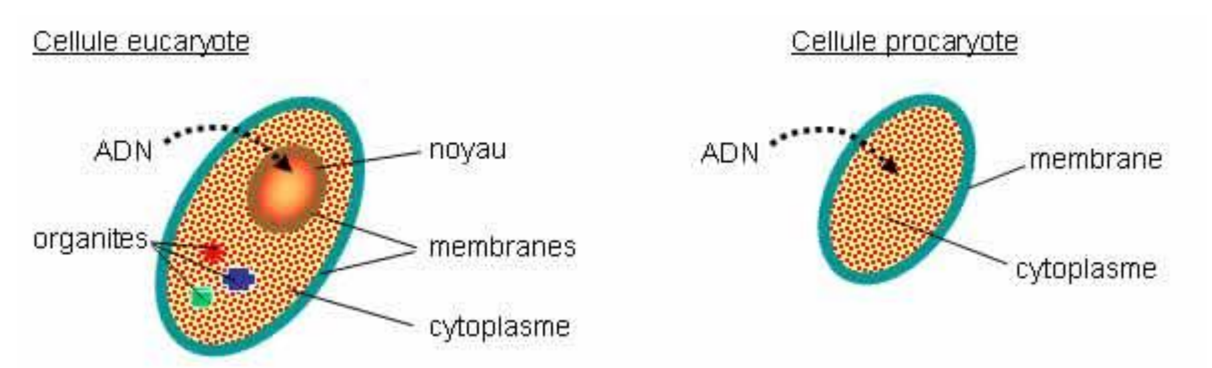
Figure 6. Voies thermochimiques et biochimiques de conversion de la biomasse lignocellulosique (adapté de Demirbas, 2009b) — *Thermochemical and biochemical ways of lignocellulosic biomass conversion (adapted from Demirbas, 2009b).*


Biomasses
de 1ère génération
de 2ème génération
Biomasse lignocellulosique
Matières amylacées
Matières sucrées
Biodéchets méthanisables
Oléagineux
Huiles usagées
Prétraitement
Hydrolyse
Extraction
Gazéification
Fermentation
Distillation
Digestion
Estérification
Purification
Méthanation
Synthèse
Déshydratation
Concentration
Biométhane
FT Diesel
DME
Bio-méthanol
H2
Bioéthanol anhydre
Bioéthanol hydraté
Biométhane
Biodiesel
Biocarburants

IV. Biocarburants de La troisième génération

IV.1. Les sources

Les biocarburants de troisième génération utilisent les micro-algues. Ce sont des organismes qui peuvent être soit les eucaryotes (présence d'un noyau) tels que les chlorophycées, soit les procaryotes (sans de présence de noyau) ou encore les cyanobactéries.



On estime de 200 000 à 1 million d'espèces différentes de micro-algues et dont seulement 30 000 ont été analysées.

Deux types de micro-algues peuvent être utilisés pour produire des biocarburants. Il y a tout d'abord les micro-algues qui peuvent être cultivées en milieu autotrophe, c'est à dire que pour se développer elles ont besoin de CO2 comme source de carbone et de la lumière comme source d'énergie. Tandis que d'autres espèces de micro-algues peuvent être cultivées en milieu hétérotrophe, elles n'ont besoins que de carbone organique comme source de carbone et d'énergie.

Ces micro-algues, comme la plupart des micro-organismes contiennent des lipides (principalement des triglycérides). Ces lipides (matière grasse) permettront la production de biocarburants, mais ne sont pas, en règle générale, produits en quantité suffisante et de manière naturelle par les micro-algues. Il est également possible d'ajouter un stress à ces micro-organismes qui permettra alors d'augmenter cette production de lipides.

En effet, une carence en azote ou une augmentation de l'intensité lumineuse va permettre d'augmenter la production de lipides. De ce fait, la teneur en lipides augmente considérablement jusqu'à atteindre 80% de la matière sèche. Cependant ces stress peuvent arrêter la croissance des micro-algues et causer la diminution de la teneur en lipide par re-consommation de celle-ci.

Le tableau ci-dessous montre le contenu maximum de lipides par les micro-algues.

Micro-algue Contenu max en lipides	(% poids sec)
Batryococcus braunii	29-75
Chlorella protothecoides	15-55
Cyclotella DI-35	42
Dunaliella tertiolecta	71,4
Hantzschia DI-160	66
Nannochloropsis	31-68
Neochloris aleoabundans	35-54
Nitzschia sp	45-50
Phaeodactylum tricornutum	31
Pleurochrysis carterae	32-35

L'utilisation des micro-algues présentes plusieurs avantages :
- Il n'y a pas de compétition avec les surfaces agricoles végétales ou animales ;
- Le haut taux de développement des micro-algues (leurs récoltes peuvent se faire à partir de 10 jours) ;
- Le rendement en biomasse à l'hectare, ainsi que la teneur en huile est supérieurs à ceux des plantes oléagineuses ;
- Ces micro-organismes ont besoin de CO_2 comme source d'énergie ou de carbone, ce qui diminue la concentration de CO_2 dans l'atmosphère ;
- Les micro-algues produisent différents types de produits annexes tels que les protéines, les vitamines et les oligo-éléments qui sont alors valorisés dans d'autres domaines (cosmétique, pharmacie).

IV.2. Les biocarburants

Plusieurs sortes de micro-algues peuvent être utilisés, et vont, de par leurs caractéristiques, permetre de produire différents types de biocarburants.
Les micro-algues riches en lipides pourront former, après trans-estérification, du biodiesel.
Ces micro-algues peuvent également produire de l'hydrogène par hydrogènase. Certaines micro-algues riches en sucre pourront former du bioéthanol après fermentation.

IV.3. Les procédés de conversion

IV.3.1. La culture des micro-algues

La production de micro-algues se fait selon deux méthodes, en fonction du type de micro algues utilisées.
Il existe tout d'abord le dispositif de culture ouverte. Ce sont des bassins de type « champ de course » d'une profondeur de quelques dizaines de centimètres.
Le milieu dans laquelle se développent les micro-algues est en déplacement continu grâce à des roues à aubes. L'image montre une culture type « champ de course ».



Les éléments nutritifs sont apportés de manière continue permettant ainsi un développement optimal des micro-algues. La source d'énergie est apportée directement par la lumière, ce qui permet le processus de photosynthèse, l'apport du CO_2 se faisant par bullage.
Cependant ce système ouvert est sensible à toutes contaminations soit par des espèces locales qui trouvent dans ces bassins les critères idéals pour se développer, soit par des espèces extérieures qui se nourrissent de ces micro-algues.



Pour éviter ces contaminations, la culture dans des photo-bioréacteurs peut être utilisée.
Pour ce type de culture (fermée) l'utilisation de micro-algues autotrophes est nécessaire car elles arrivent, à l'aide de l'énergie lumineuse, à créer leur propre substance organique.
La réaction montre le principe de la photosynthèse qui permet de produire leurs propres éléments nutritifs :

$$6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

Il est donc indispensables pour la croissance des micro-algues d'utiliser des parois transparentes qui permettent de laisser passer une intensité lumineuse suffisante, un apport en CO_2 est également nécessaire. Pour éviter une température trop élevée au sein du photo-bioréacteur, il suffit de réguler celle-ci à l'aide d'un système de pompage d'eau de mer, le milieu peut ensuite être déversé dans un étang où la phase de stress est réalisée pour augmenter le taux de lipides. L'image montre un photo-bioréacteur utilisé pour la croissance des micro-algues.

IV.3.2. Récolte des micro-algues, extraction des huiles et transformation

La récolte de ces micro-algues peut se faire de différentes façons. Cette étape est assez complexe de par la taille des algues qui est de quelques microns et de par la densité des micro-algues proche de celle de l'eau. Certaines espèces peuvent se récolter directement par filtration sur soie, telle que la spiruline qui est une cyanobactérie ou par filtration membranaire.



Récolte de la spiruline

Pour la plupart des espèces, il faut tout d'abord passer par une étape de pré-concentration afin de réduire le taux d'humidité.
L'huile est ensuite extraite selon différentes méthodes telles que l'extraction par solvant (type hexane) ou la centrifugation. Cette huile peut alors, par des procédés identiques à ceux de la deuxième génération, former des biocarburants.
L'utilisation de la trans-estérification va permettre de faire réagir l'huile avec du méthanol ou de l'éthanol et ainsi produire du biodiesel. On peut également, par conversion thermochimique (liquéfaction), produire des hydrocarbures qui pourront être mélangés au gazole ou au kérosène. La production de bioéthanol peut se faire également grâce à la méthode de fermentation classique.

Enfin, les micro-algues ont la capacité de produire de l'hydrogène, cependant cette réaction n'est produite qu'en situation de stress. En effet, lorsque les conditions nutritives ne sont pas suffisantes pour que la micro-algue puisse se développer, celle-ci doit se débarrasser des électrons accumulés lors de la photosynthèse. Cette réaction est permise à l'aide d'une enzyme appelée hydrogénase, l'algue utilise pour cette transformation des protons présents dans son environnement.
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

Toutefois, cet hydrogène formé peut être ingéré par la micro-algue comme source d'énergie, les chercheurs essaient donc de trouver des solutions pour éviter ce phénomène.

La troisième génération, est encore au niveau expérimental, on ne peut donc pas encore savoir si, à grande échelle de production, cette technologie sera fiable. Cependant aux vues des résultats actuels, cette génération est prometteuse. En effet, les micro-algues sont des ressources renouvelables à l'échelle de la vie humaine et, de plus, elles réduisent la concentration du CO_2 dans l'atmosphère. Cependant un inconvénient de taille est encore à améliorer : les coûts de production de ces biocarburants, de la deuxième et de la troisième génération restent très élevés.

References

1- BALLERINI Daniel, « Biocarburants (Les), État des lieux, perspectives et enjeux du développement », Technip, 2006
2- http://popups.ulg.ac.be/1780-4507/index.php?id=8007